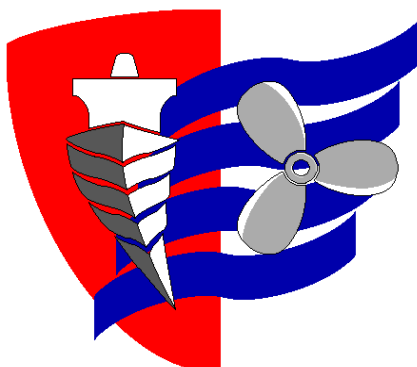


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**Diseño de un contenedor cisterna
ISO bajo las normas ADR y IMDG**

**Design of an ISO tank container under
ADR and IMDG standards**

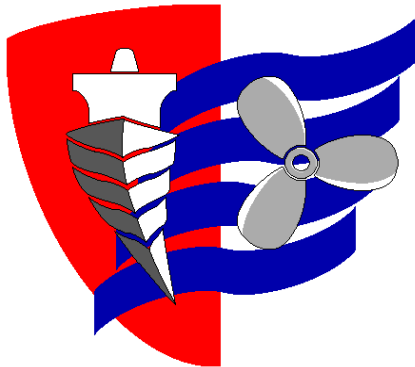
Para acceder al Título de Grado en
INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Marian Gomis Herrera

Director: Francisco José Correa Ruiz

Septiembre – 2021

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



Trabajo Fin de Grado

**Diseño de un contenedor cisterna
ISO bajo las normas ADR y IMDG**

**Design of an ISO tank container under
ADR and IMDG standards**

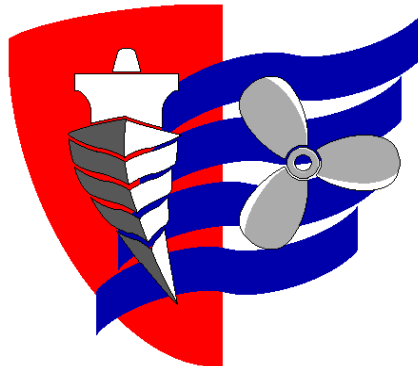
Para acceder al Título de Grado en
INGENIERÍA MARÍTIMA

Septiembre – 2021

1. Memoria.	8
1.1. Objetivo.	8
1.1.1. Objetivos específicos.	8
1.2. Normativa.	8
1.3. Programas.	9
1.4. Descripción de la materia a transportar.	9
1.5. Requisitos de diseño.	11
1.5.1. Requisitos ADR.	11
1.5.2. Requisitos IMDG.	11
1.6. Grado de llenado.	13
1.7. Etiquetado de la cisterna.	15
1.7.1. Placas - etiquetas de clase.	15
1.7.2. Panel naranja.	16
1.7.3. Indicación del nombre de expedición.	16
1.7.4. Marcado.	17
1.7.5. Sistema de identificación.	18
1.7.6. Códigos de dimensiones y de tipo.	20
1.8. Equipos.	22
1.8.1. Válvulas.	22
1.8.2. Pasarelas y escaleras.	24
1.9. Caracterización del contenedor cisterna.	24
1.9.1. Estructura.	24
1.9.1.1. Cantoneras.	25
1.9.1.1. Largueros.	27
1.9.1.2. Marcos.	28
1.9.1.3. Refuerzos.	28
1.9.2. Dimensionamiento de la cisterna.	28
1.9.2.1. Diámetro.	29
1.9.2.2. Fondos.	30
1.9.2.3. Virola.	31
1.9.2.4. Dimensiones generales.	31
1.9.2.5. Brida de la boca de hombre.	32
1.9.2.6. Tapa de la boca de hombre.	33
1.9.2.7. Tubo buzo.	33

1.9.2.8.	Unión de la cisterna a la estructura.	33
1.9.2.9.	Domo.....	34
1.9.3.	Peso de la estructura.	35
1.9.4.	Peso de la cisterna.	36
1.9.5.	Comprobación.....	36
1.10.	Selección del material.	38
1.10.1.	Cisterna.....	38
1.10.1.1.	Cumplimiento de la normativa del ADR y IMDG.	39
1.10.2.	Estructura.....	42
2.	Cálculos.	45
2.1.	Cálculo de presiones.	45
2.2.	Cálculo de espesores.	52
2.2.1.	Virola.	52
2.2.2.	Espesor de los fondos.	59
2.3.	Aberturas de la envolvente.	63
2.4.	Tapa de la boca de hombre.	67
2.5.	Cálculo de la presión externa.....	71
2.6.	Caudal mínimo de la válvula de seguridad.	79
3.	Validación del diseño.	84
3.1.	Requisitos de las normas.....	85
3.2.	Aplicación del material.....	86
3.3.	Mallado del diseño.....	87
3.4.	Comentarios sobre la simulación.	88
3.5.	Ensayos.	88
4.	Proceso de fabricación.	128
4.1.	Virola.....	128
4.2.	Estructura.	131
4.3.	Pruebas e inspecciones.	135
4.4.	Tratamiento térmico de distensionado.	135
4.5.	Pintura.	136
4.6.	Tubo buzo.....	136
4.7.	Montaje final.	138
5.	Presupuesto.....	141
6.	Bibliografía y documentación.....	144
7.	Disposición general.....	142

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



MEMORIA

Documento 1

Trabajo de fin de grado
Ingeniería Marítima

1. Memoria.....	8
1.1. Objetivo.....	8
1.1.1. Objetivos específicos.....	8
1.2. Normativa.....	8
1.3. Programas.	9
1.4. Descripción de la materia a transportar.....	9
1.5. Requisitos de diseño.	11
1.5.1. Requisitos ADR.....	11
1.5.2. Requisitos IMDG.....	11
1.6. Grado de llenado.....	13
1.7. Etiquetado de la cisterna.....	15
1.7.1. Placas - etiquetas de clase.....	15
1.7.2. Panel naranja.	16
1.7.3. Indicación del nombre de expedición.	16
1.7.4. Marcado.....	17
1.7.5. Sistema de identificación.	18
1.7.6. Códigos de dimensiones y de tipo.....	20
1.8. Equipos.....	22
1.8.1. Válvulas.....	22
1.8.2. Pasarelas y escaleras.....	24
1.9. Caracterización del contenedor cisterna.....	24
1.9.1. Estructura.....	24
1.9.1.1. Cantoneras.....	25
1.9.1.1. Largueros.....	27
1.9.1.2. Marcos.	28
1.9.1.3. Refuerzos.	28
1.9.2. Dimensionamiento de la cisterna.	28
1.9.2.1. Diámetro.	29
1.9.2.2. Fondos.....	30
1.9.2.3. Virola.....	31

1.9.2.4.	Dimensiones generales.	31
1.9.2.5.	Brida de la boca de hombre.	32
1.9.2.6.	Tapas de la boca de hombre.	33
1.9.2.7.	Tubo buzo.	33
1.9.2.8.	Unión de la cisterna a la estructura.	33
1.9.2.9.	Domo.	34
1.9.3.	Peso de la estructura.	35
1.9.4.	Peso de la cisterna.	36
1.9.5.	Comprobación.	36
1.10.	Selección del material.	38
1.10.1.	Cisterna.	38
1.10.1.1.	Cumplimiento de la normativa del ADR y IMDG.	39
1.10.2.	Estructura.	42

1. Memoria.

1.1. Objetivo.

El objetivo principal del trabajo es diseñar un contenedor cisterna para el transporte de fluoruro de hidrógeno anhidro bajo las normas ADR (Acuerdo de transporte de mercancías peligrosas por carretera), IMDG (Código marítimo internacional de mercancías peligrosas), CSC (convenio internacional sobre la seguridad de los contenedores) y otras relacionadas.

1.1.1. Objetivos específicos.

Se plantean una serie de objetivos específicos para llevar a cabo el objetivo principal:

- Determinar los requisitos de diseño.
- Definir las dimensiones en Rhinoceros de manera que se cumpla la norma a la vez que se optimiza la capacidad de la cisterna.
 - Definir el material adecuado para la construcción del contenedor.
 - Adaptar el diseño a los reglamentos: cálculos y dimensiones.
 - Generar un diseño del contenedor completo en SolidWorks.
 - Comprobar el diseño del conjunto a partir de un análisis de elementos finitos.

1.2. Normativa.

En este apartado se incluyen las normas que han sido necesarias para la realización del proyecto tanto por su aplicación obligatoria como por consulta. En el caso de la existencia de una discrepancia entre dos normas, prevalecerá la más restrictiva.

- ADR. *Acuerdo de transporte de mercancías peligrosas por carretera.*
- IMDG. *Código marítimo internacional de mercancías peligrosas.*
- UNE-EN 10028-3. *Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 3: aceros soldables de grano fino en condición de normalizado.*
- UNE-EN 13445-3. *Recipientes a presión no sometidos a la acción de la llama. Parte 3: Diseño.*

- UNE-EN 14025. *Cisternas para el transporte de mercancías peligrosas. Cisternas metálicas sometidas a presión. Diseño y construcción.*
- UNE-EN 10025-2. *Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.*

- UNE EN-ISO 6346. *Contenedores para el transporte de mercancías. Codificación, identificación y marcado.*
- UNE 49756-2. *Ensayos para contenedores-cisternas de la serie 1 para líquidos y gases.*
- UNE 117101. *Contenedores de la serie 1. Clasificación, dimensiones y masas brutas máximas.*
- UNE 117102-1. *Contenedores de la serie 1. Especificaciones y ensayos. Parte 1: contenedores de uso general para mercancías diversas.*
- CSC. *Convenio internacional sobre la seguridad de los contenedores.*
- ISO 1116. *Contenedores de la serie 1. Esquineros. Especificación.*
- ISO 1496-3. *Series 1 freight containers. Part 3: tank containers for liquids, gases, and pressurized dry bulk.*
- ISO 668. *Series 1 freight containers. Classification, dimensions, and ratings.*

1.3. Programas.

Para la realización del proyecto se han utilizado los siguientes programas:

- Rhinoceros. Dimensionamiento del diseño.
- SolidWorks. Dibujo del diseño definitivo y validación de este.
- Microsoft Excel. Realización de cálculos.
- Microsoft Word. Redacción del proyecto.

1.4. Descripción de la materia a transportar.

Para llevar a cabo el diseño del contenedor lo primero que se ha de conocer es la sustancia que se va a transportar, en este caso será fluoruro de hidrógeno anhidro (número ONU 1052).

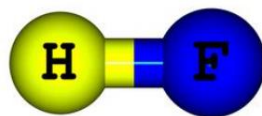


Figura 0-1: Molécula de HF. Fuente: Derivados del flúor.

La siguiente tabla expone las propiedades básicas del fluoruro de hidrógeno:

Fórmula química	HF
Aspecto	Gas o líquido fumante por debajo de su punto de ebullición
Color	Líquido incoloro / vapor blanco
Solubilidad	Muy soluble
Punto de ebullición	19,5 °C
Punto de fusión	-84 °C
Peso específico	1 t/m ³ a 15°C
Propiedades explosivas	No explosivo
Propiedades oxidantes	No oxidante

Tabla 1: Propiedades básicas del HF. Fuente: Mexichem flúor.

En Cantabria se encuentra la empresa Derivados del Flúor SL, que se encarga de la producción y el transporte de fluoruro de hidrógeno. Se trata de una exportación a nivel internacional ya que se utiliza como materia prima en diversos procesos de fabricación como la producción de microchips para circuitos electrónicos, plásticos, productos farmacéuticos, gases refrigerantes y otros.

El HF puede llegar a ser mortal por inhalación, ingestión o por contacto con la piel. Al ser una sustancia tan tóxica se tiene especial cuidado en su transporte y manipulación, por lo que se ordena el uso de equipo autónomo de respiración y ropa de protección.

Las normas IMDG y ADR clasifican el fluoruro de hidrógeno según la siguiente tabla:

Norma	Clase	Grupo de embalaje	Cantidades limitadas y exceptuadas	Instrucciones de transporte	Disposiciones especiales	Número de identificación de peligro
ADR	8	I	E0	T10	TP2	886
IMDG	8	I	Ninguna	T10	TP2	-

Tabla 2: Clasificación del HF según el ADR y el IMDG. Fuente: ADR/IMDG sección 1.

1.5. Requisitos de diseño.

1.5.1. Requisitos ADR.

A continuación, se exponen los requisitos de diseño a considerar en el proyecto para la materia a transportar:

Instrucciones de transporte. Cisternas portátiles.

T10	Presión mínima de prueba: 4 bar.
	Espesor mínimo: 6 mm.
	Dispositivo de descompresión según 6.7.2.8.3 con disco de rotura tarado un 10% por encima del tarado de la válvula de seguridad y manómetro de control.
	Aperturas por el fondo no autorizadas.

Tabla 3: Instrucciones de transporte HF según ADR. Fuente ADR 4.2.5.2.6.

Disposiciones especiales. Cisternas portátiles.

TP2	El grado de llenado no deberá sobrepasar el valor del 4.2.1.9.3
------------	---

Tabla 4. Disposiciones especiales según ADR. Fuente: ADR 4.2.5.3.

1.5.2. Requisitos IMDG.

Los requisitos de diseño para tener en cuenta para el proyecto según la norma IMDG son los siguientes:

Instrucciones sobre cisternas portátiles.

T10	Presión mínima de prueba: 4 bar.
	Espesor mínimo: 6 mm.
	Dispositivo de descompresión según 6.7.2.8.3 con disco de rotura tarado un 10% por encima del tarado de la válvula de seguridad y manómetro de control.
	Aperturas por el fondo no autorizadas.

Tabla 5: Instrucciones sobre cisternas portátiles según IMDG. Fuente IMDG 4.2.5.2.6.

Disposiciones.

TP2	Se respetará el grado de llenado previsto en 4.2.1.9.3
------------	--

Tabla 6: Disposiciones especiales según IMDG. Fuente: IMDG 4.2.5.3.

1.5.3. Requisitos de proyecto.

Debido a la corrosividad y peligrosidad del producto, se ha decidido tratarlo como un contenedor tipo T20. Aumentando así su espesor mínimo y su presión de prueba por razones de seguridad, garantizando así un margen de espesor para la futura corrosión del material. La normativa es más restrictiva para un contenedor tipo T20 que para uno tipo T10, lo que no supone ningún problema a la hora de aplicar la norma.

Requisitos ADR.

Instrucciones de transporte. Cisternas portátiles.

T20	Presión mínima de prueba: 10 bar.
	Espesor mínimo: 8 mm.
	Dispositivo de descompresión según 6.7.2.8.3 con disco de rotura tarado un 10% por encima del tarado de la válvula de seguridad y manómetro de control.
	Aperturas por el fondo no autorizadas.

Tabla 7: Instrucciones de transporte HF según ADR. Fuente ADR 4.2.5.2.6.

Requisitos IMDG.

Instrucciones sobre cisternas portátiles.

T20	Presión mínima de prueba: 10 bar.
	Espesor mínimo: 8 mm.
	Dispositivo de descompresión según 6.7.2.8.3 con disco de rotura tarado un 10% por encima del tarado de la válvula de seguridad y manómetro de control.
	Aperturas por el fondo no autorizadas.

Tabla 8: Instrucciones sobre cisternas portátiles según IMDG. Fuente IMDG 4.2.5.2.6.

1.6. Grado de llenado.

El grado de llenado de la cisterna será el menor de:

- Según las disposiciones especiales aplicables al transporte en cisternas portátiles para TP2 en las normas ADR y IMDG (4.2.5.3.), el grado de llenado no deberá sobrepasarse del que indica el punto 4.2.1.9.2:

$$\text{grado de llenado} = \frac{95}{1 + \alpha \cdot (t_r - t_f)}$$

- 4.2.1.9.3. Donde α representa el coeficiente medio de dilatación cúbica del líquido entre la temperatura media del líquido durante el llenado (t_f) y la temperatura media máxima de la carga durante el transporte (t_r), (en °C). Para los líquidos transportados en condiciones ambientales, α podrá ser calculado por la fórmula:

$$\alpha = \frac{d_{15} - d_{50}}{35 \cdot d_{50}}$$

Se consideran las siguientes temperaturas y se extraen las densidades de la gráfica:

Tabla 9: Densidades obtenidas del gráfico. Fuente: Figura 2.

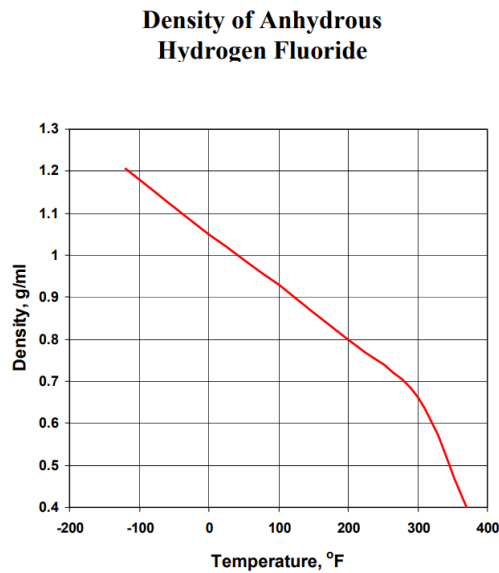


Figura 0-2: Densidad HF. Fuente: Honeywell.

t_r	15°C	59°F
t_f	50°C	122°F
d_{15}	0,98 g/ml	
d_{50}	0,90 g/ml	

Tabla 10: Densidades obtenidas del gráfico. Fuente: Figura 2.

Para los datos anteriores, los resultados son:

$$\alpha = 0,0257143$$
$$\text{grado de llenado} = 88,6 \%$$

- Para la instrucción TU34 de disposiciones especiales (4.3.5.) para cisternas portátiles, en la materia con número ONU 1052, el grado de llenado no deberá sobrepasar 0,84 kg/l.
- Por lo tanto, el grado de llenado no podrá sobrepasar el menor de los dos anteriormente nombrados.

Grado de llenado
0,84 kg/l

1.7. Etiquetado de la cisterna.

1.7.1. Placas - etiquetas de clase.

En el ADR y IMDG, el punto 5.2. define el tipo de etiquetas y marcado debe llevar una cisterna dependiendo del tipo de mercancía que transporte.

Las etiquetas de clase/división deben estar sobre un fondo de color que ofrezca un buen contraste y son de las siguientes características:

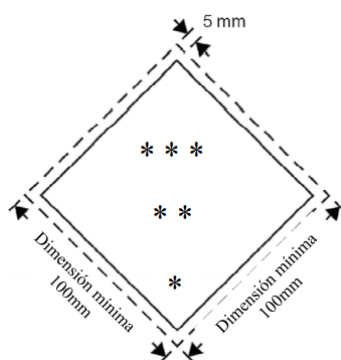


Figura 3: Etiqueta de clase/división. Fuente: ADR.

Las etiquetas que corresponden a las cisternas que transportan sustancias de clase 8 son las siguientes:



Figura 4: Sustancia tóxica. Fuente: IMDG.



Figura 5: Sustancia corrosiva. Fuente: IMDG.

Estas deben ir colocadas en los costados y a ambos extremos de la cisterna.

1.7.2. Panel naranja.

El código IMDG y la norma ADR en el punto 5.3.2.1. exigen la colocación de cuatro paneles naranjas de forma rectangular ubicados horizontalmente en las cuatro caras del contenedor de la materia, en este caso una cisterna.

Estos paneles deben ir dispuestos del número de identificación del peligro y el número ONU. En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de panel naranja con sus dimensiones y características:

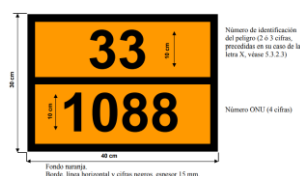


Figura 6: Ejemplo de panel naranja. Fuente: ADR.

El número de peligro del fluoruro de hidrógeno anhidro, según la tabla de identificación de la sustancia en el ADR y IMDG es 886. Y el número ONU de la sustancia es 1052. Por lo tanto, el panel naranja de un contenedor cisterna de fluoruro de hidrógeno debe portar paneles similares al siguiente:

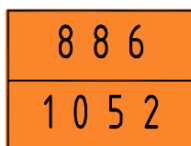


Figura 7: Panel naranja para HF.

1.7.3. Indicación del nombre de expedición.

El nombre de expedición del contenido deberá ir marcado a ambos lados en la cisterna (IMDG 5.3.2.). En este caso, se debe colocar un cartel como el siguiente:

FLUORURO DE HIDRÓGENO ANHIDRO

1.7.4. Marcado.

De acuerdo con el punto 6.7.2.20.1. (ADR/IMDG) toda cisterna portátil llevará instalada una placa de identificación de metal resistente a la corrosión, fijada de modo permanente en un lugar bien visible y de fácil acceso para la inspección. A continuación, se muestra una plantilla de la placa de identificación que exige cada norma:

Número de registro del propietario					
INFORMACIÓN SOBRE LA FABRICACIÓN					
País de fabricación					
Año de fabricación					
Fabricante					
Número de serie del fabricante					
INFORMACIÓN SOBRE LA APROBACIÓN					
	País de aprobación				
	Organismo autorizado para la aprobación de tipo				
	Número de aprobación de tipo				“AA” si procede
Código de diseño del depósito (código de los aparatos a presión)					
PRESIONES					
PSMA(MAWP)					bar o kPa
Presión de prueba					bar o kPa
Fecha de la prueba de presión inicial				(mm/aaaa)	Sello del perito:
Presión externa de cálculo					bar o kPa
PSMA(MAWP) para el sistema de calefacción/refrigeración (según proceda)					bar o kPa
TEMPERATURAS					
Intervalo de temperaturas de diseño					°C a °C
MATERIALES					
Material(es) del depósito y referencia(s) de la norma o normas de los materiales					
Espesor equivalente en acero de referencia					
Material de revestimiento (si los hubiere)					
CAPACIDAD					
Capacidad en agua de la cisterna a 20 °C					litros “S” (si procede)
Capacidad en agua del compartimento _ a 20°C (cuando proceda, en cisternas de varios compartimentos)					litros “S” (si procede)
INSPECCIONES PERIÓDICAS / PRUEBAS					
Tipo de prueba	Fecha de la prueba (mm/aaaa)	Sello del perito y presión de prueba ^a bar o kPa	Tipo de prueba	Fecha de la prueba (mm/aaaa)	Sello del perito y presión de prueba ^a bar o kPa

Figura 8: Placa de identificación ADR. Fuente: ADR.


Número de matrícula del propietario			
INFORMACIÓN SOBRE LA FABRICACIÓN			
País de fabricación			
Año de fabricación			
Fabricante			
Número de serie del fabricante			
INFORMACIÓN SOBRE LA APROBACIÓN			
	País de aprobación		
	Organismo autorizado para la aprobación del diseño		
	Número de aprobación del diseño		"AA" (si procede)
Código de diseño del depósito (código para recipientes a presión)			
PRESIONES			
PSMA		bar o kPa	
Presión de ensayo		bar o kPa	
Fecha del ensayo de presión inicial:	(mm/aaaa)	Sello del testigo:	
Presión de cálculo externa		bar o kPa	
PSMA para el sistema de calefacción/refrigeración (según proceda)		bar o kPa	
TEMPERATURAS			
Gama de temperaturas de cálculo		°C a °C	
MATERIALES			
Material(es) del depósito y referencia(s) de la norma o normas de los materiales			
Espesor equivalente en acero de referencia		mm	
Material de revestimiento (si lo hubiere)			
CAPACIDAD			
Capacidad en agua de la cisterna a 20 °C		litros	"S" (si procede)
Capacidad en agua del compartimento _____ a 20 °C (cuando proceda, para cisternas con varios compartimentos)		litros	"S" (si procede)
INSPECCIONES/ENSAYOS PERIÓDICOS			
Tipo de ensayo	Fecha del ensayo	Sello del testigo y presión de ensayo*	Tipo de ensayo
	(mm/aaaa)	bar o kPa	(mm/aaaa)

Figura 9: Placa de identificación. Fuente: IMDG.

Además, sobre la cisterna portátil deben ir indicados:

El nombre de la empresa explotadora, la masa bruta máxima admisible (kg) y la tara del contenedor (kg).

1.7.5. Sistema de identificación.

La norma ISO 6346 exige la colocación de un sistema de identificación que comprenda los siguientes elementos:

Código del propietario: debe estar formado por tres letras mayúsculas y debe ser único y estar registrado en la Oficina Internacional de Contenedores (BIC).

Código del propietario: MGH

Identificador de la categoría de equipo: una letra mayúscula para todos los contenedores de transporte de mercancías (U), para los equipos móviles asociados a los contenedores de transporte de mercancías (J) y para remolques y batidores (Z).

Identificador de la categoría de equipo: U

Número de serie: el número de serie del contenedor deberá consistir en seis cifras.

Número de serie: 230697

Cifra de autocontrol: la cifra de autocontrol proporciona un medio de verificar la exactitud de la transmisión del código del propietario y del número de serie, y deberá determinarse según el Anexo A. La cifra de autocontrol deberá validar el código del propietario, el identificador de la categoría de equipo y el número de serie del contenedor.

A partir de la siguiente tabla se determina la cifra de autocontrol para el código del propietario:

Código del propietario/identificador de la categoría				Número de serie
Letra	Valor equivalente	Letra	Valor equivalente	Cifra o valor equivalente ¹⁾
A	10	N	25	0
B	12	O	26	1
C	13	P	27	2
D	14	Q	28	3
E	15	R	29	4
F	16	S	30	5
G	17	T	31	6
H	18	U	32	7
I	19	V	34	8
J	20	W	35	9
K	21	X	36	
L	23	Y	37	
M	24	Z	38	

Tabla 11. Determinación de la cifra de autocontrol. Fuente: ISO 6346.

Código del propietario

Número de serie

M	G	H	U	2	3	0	6	9	7
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Se aplica la tabla al código del propietario, el número de serie es el mismo:

Valores equivalentes

24	17	18	32	2	3	0	6	9	7
----	----	----	----	---	---	---	---	---	---

Cada valor numérico equivalente, debe multiplicarse por un factor de ponderación de 2⁰ a 2⁹, desde la primera letra del código al último número del número de serie:

24 x 2⁰	17 x 2¹	18 x 2²	32 x 2³	2 x 2 ⁴	3 x 2 ⁵	0 x 2 ⁶	6 x 2 ⁷	9 x 2 ⁸	7 x 2 ⁹
---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

El producto y la suma de la tabla anterior es: 3458

Se divide por 11:

$$3458/11 = 314 \text{ con resto } 4$$

La cifra de autocontrol se determina de la siguiente tabla:

Valores de la cifra de autocontrol

Resto	Cifra de autocontrol
10	0
9	9
8	8
7	7
6	6
5	5
4	4
3	3
2	2
1	1
0	0

Tabla 12: Valores cifra autocontrol. Fuente: ISO 6346.

Por lo tanto, la cifra de autocontrol es 4. El sistema de identificación es el siguiente:

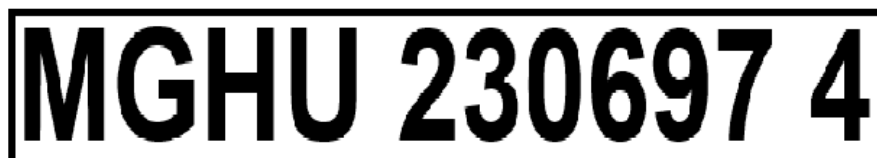


Figura 10: Sistema de identificación. Fuente propia.

1.7.6. Códigos de dimensiones y de tipo.

La norma ISO 6346 obliga a marcar la siguiente codificación en los contenedores:

Código de dimensiones: se deben codificar las dimensiones de altura, anchura y longitud del contenedor. Estos caracteres deben determinarse según las siguientes tablas:

Diseño de un contenedor cisterna ISO bajo las normas ADR y IMDG

Primer carácter			Segundo carácter				
Longitud			Altura		Código		
mm	ft	in	Anchura				
2 991	10						
6 068	20						
9 125	30						
12 192	40						
libre							
libre							
libre							
libre							
libre							
7 150							
7 315	24						
7 430	24	6					
7 450	-						
7 820	-						
8 100	-						
12 500	41						
13 106	43						
13 600	-						
13 716	45						
14 630	48						
14 935	49						
16 154	-						
libre							

Tabla 11: Código de designación de las dimensiones. Fuente: ISO 6346.

De la tabla se determina que el código para la altura y la anchura es:

22

Código de tipo: el tipo de contenedor y sus características principales deberán indicarse por medio de los dos caracteres siguientes:

- primer carácter: carácter alfabético que representa el tipo de contenedor.
- segundo carácter: carácter numérico que representa las características principales relativas al tipo de contenedor.

Se determina a partir de la siguiente tabla:

Código de tipo	Designación del tipo	Código de tipo reagrupado	Características principales	Código de tipo completo
T	Contenedor cisterna			
	- para líquidos no peligrosos	TN	- Presión mínima 45 kPa ¹⁾ - Presión mínima 150 kPa - Presión mínima 265 kPa	T0 T1 T2
	- para líquidos peligrosos	TD	- Presión mínima 150 kPa - Presión mínima 265 kPa - Presión mínima 400 kPa - Presión mínima 600 kPa	T3 T4 T5 T6
	- para gas	TG	- Presión mínima 910 kPa - Presión mínima 2 200 kPa - Presión mínima (por decidir)	T7 T8 T9

Tabla 12: Designación del código de tipo. Fuente: ISO 6346.

El código de tipo según la tabla anterior es:

T6

Por lo que el código de dimensiones y de tipo que ha de colocarse en el contenedor es el siguiente:

22T6

Figura 11: Código de dimensiones y de tipo. Fuente propia.

1.8. Equipos.

1.8.1. Válvulas.

El llenado y vaciado de la carga se hacen a través de válvulas de triple cierre de la marca Phönix y el modelo 309.50 D 40 PN 25 (50 mm) y están situadas en la tapa de la boca de hombre. Se trata de una válvula de fase gas y dos válvulas de fase líquida para adaptar el proceso de carga y descarga en distintas instalaciones. Las válvulas de fase líquida van unidas a un tubo buzo para poder efectuar el vaciado completo de la carga.

La altura de las válvulas son las siguientes:

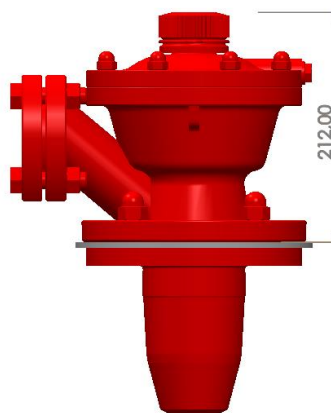


Figura 12: Válvula Phonix. Fuente: Phonix.

Se puede dividir la válvula en dos partes, la inferior y la superior. En la parte inferior se encuentra una válvula de retención que lleva una bola de teflón con asiento que mantiene cerrada la válvula gracias al muelle y a la presión interna. La parte superior consiste en el mecanismo de apertura para carga y descarga. La apertura se realiza a

través de un actuador neumático incorporado en la propia válvula; en la parte superior se llena la cámara de aire a presión que empuja el vástago que se encarga de abrir el asiento de la válvula superior y simultáneamente la bola de teflón para permitir el llenado y vaciado.

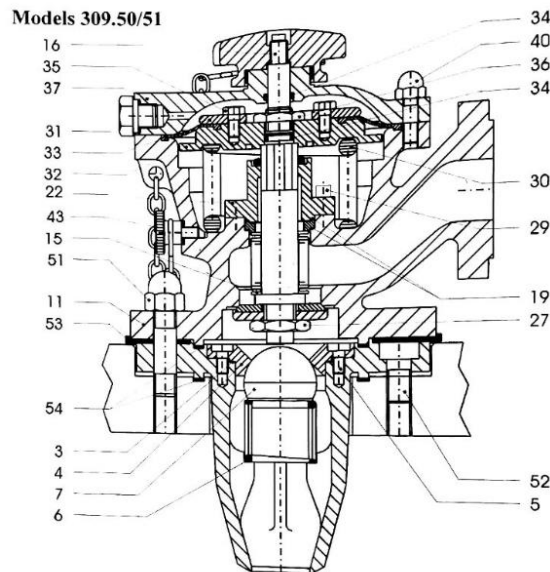


Figura 13: Sección válvula Phonix. Fuente: Phonix.

Además, las instrucciones de transporte en el ADR/IMDG exigen la instalación de un dispositivo de descompresión con un disco de rotura tarado un 10% por encima del tarado de la válvula de seguridad. De manera que se instala una válvula de seguridad Fort Vale de 2 ½ pulgadas, precedida de disco de rotura y manómetro de control. En la siguiente ilustración se muestra un dibujo de un disco de rotura:

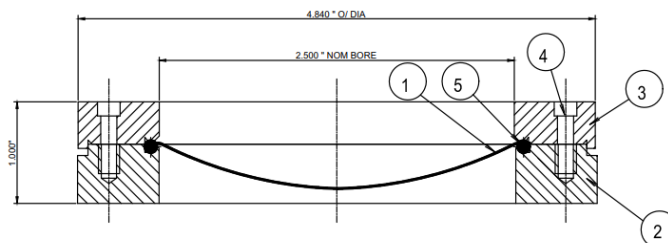


Figura 14: Disco de rotura. Fuente: Marston.

El disco de rotura mantiene estanco el depósito en todo momento. Cuando la cisterna sufre una sobrepresión que puede provocar un accidente más grave que la fuga de la carga, el disco se rompe y permite liberar la presión. Los discos están calibrados un 10 % por encima del tarado de la válvula de seguridad, como dice la norma.

El manómetro de control permitirá controlar el estado del disco de rotura, ya que si marca presión significará que el disco se ha roto.

La válvula de seguridad solo abrirá cuando la sobrepresión supere la presión tarada en el disco de rotura, y se cerrará cuando haya liberado suficiente presión para equilibrar la presión de tarado de la válvula. Se dimensionan en el punto 6.7.2.12.1. o la tabla del punto 6.7.2.12.2.3. del IMDG/ADR. El muelle de la válvula se tara en función de la presión de descompresión, que se calcula a través de la norma.

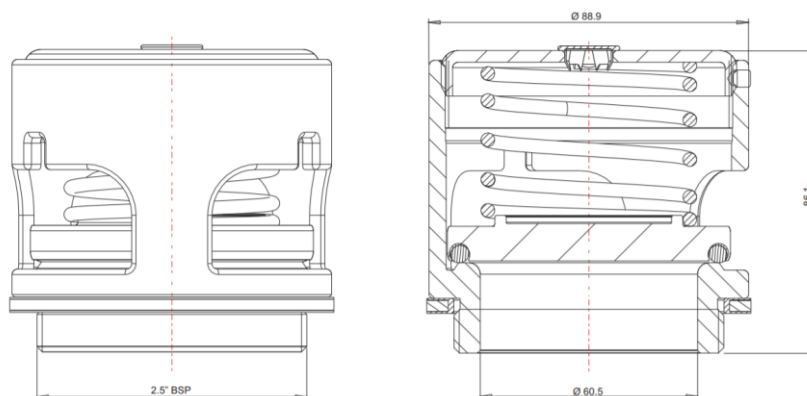


Figura 15: Válvula de seguridad sin disco de rotura. Fuente: Fort Vale.

Todas las válvulas salen de fábrica homologadas y marcadas según la Directiva 97/23 CE relativa a los equipos de presión.

1.8.2. Pasarelas y escaleras.

Se colocará una escalera de gato en cada cara lateral del contenedor y dos pasarelas en la cara superior, una a cada lado, para poder acceder a la boca de hombre.

Según la norma ISO 1496-3 la escalera y pasarela no son unas características obligatorias, pero, en caso de ser colocadas deben cumplir los siguientes requisitos:

La escalera tiene que soportar un mínimo de 200 kg. La pasarela en una superficie de 600 mm x 300 mm debe soportar una carga de al menos 3Kn. Además, deben ser de al menos 400 mm de ancho.

1.9. Caracterización del contenedor cisterna.

1.9.1. Estructura.

Para diseñar el contenedor se hace uso de la norma ISO 668 y ISO 1161.

Tipo	Largo	Ancho	Alto	Rating
1CC	6058 mm	2438 mm	2591 mm	30480 kg

Tabla 13: Dimensiones contenedor 1CC. Fuente: ISO 668

Una vez obtenidas las medidas principales, se calcula la medida de cada elemento que lo compone.

1.9.1.1. Cantoneras.

Las cantoneras se obtendrán de la empresa Suer, que distribuye cantoneras homologadas según la norma ISO 1161.



Figura 16: CC2975L. Fuente: Suer

Existen cuatro tipos de cantoneras según su colocación en la estructura, las posiciones de las aberturas son distintas, pero las dimensiones exteriores son las mismas. Según los datos del fabricante el peso de las cantoneras es de 11 kg y las medidas son las siguientes:

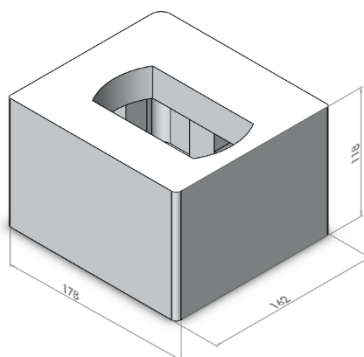


Figura 17: Cantonera acotada. Fuente propia.

Los cuatro modelos necesarios son los siguientes:

- CC297TL – Esquina superior izquierda. ■
- CC298TR – Esquina superior derecha. ■
- CC299BL – Esquina inferior izquierda. ■
- CC300BR – Esquina inferior derecha. ■

Se colocan dos de cada tipo ubicadas como se muestra en la siguiente imagen:

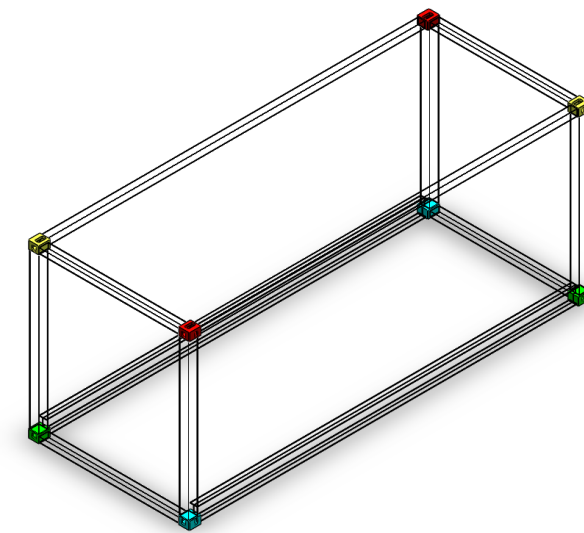


Figura 18: Ubicación de las cantoneras por colores. Fuente propia.

Por último, las cantoneras van colocadas de manera que el lado que mide 178 va en el sentido del larguero, y el lado de 162 mm en el sentido del marco. Las caras planas sin aberturas son las que van soldadas a los largueros y los marcos, mientras que las aberturas van orientadas hacia fuera.

En la siguiente imagen se muestra la colocación:

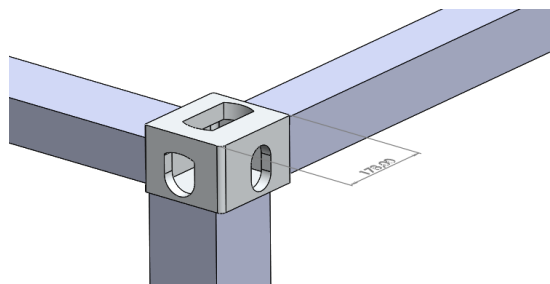


Figura 19: Colocación de las cantoneras. Fuente propia.

En las aberturas de la cara superior van insertados los twistlocks, que son los cierres de giro que permiten asegurar la sujeción del contenedor durante su transporte, además de facilitar el manejo del contenedor a la hora de elevarlo con una grúa.

Las aberturas de las caras laterales son empleadas para las maniobras que requieran el izado del contenedor con eslingas.

Con los datos anteriores se calculan las medidas de los largueros y los marcos.

1.9.1.1. Largueros.

Para los largueros superiores se opta por tubo cuadrado de 100 x 100 con 3 mm de espesor.

El contenedor viajará con cuatro puntos de sujeción en las cantoneras inferiores, por lo que los largueros inferiores estarán sometidos a mayores esfuerzos que los superiores. Se decide que estos largueros deben ser de una resistencia mayor por lo que se opta por un perfil IPE 220 con las siguientes medidas:

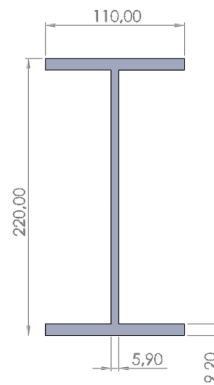


Figura 20: Perfil IPE 220. Fuente propia.

La longitud de los largueros será la del espacio existente entre las cantoneras posicionadas a la distancia que exige la normativa. En la tabla se calcula la medida de los tubos de los largueros:

	b (horizontal)	Piezas
Longitud total	6058 mm	
Cantonera	178 mm	2
Longitud tubo	5702	

Tabla 14: Cálculo de longitud de los largueros. Fuente propia.

1.9.1.2. Marcos.

Los marcos verticales, es decir, los laterales, estarán compuestos de tubos cuadrados de 140 x 140 con un espesor de 8 mm. En cambio, los marcos superior e inferior, al estar expuestos a menos esfuerzos de compresión, serán de 140 x 80 con un espesor de 4 mm.

La longitud de los marcos depende, una vez más, de la longitud impuesta por la norma. En la siguiente tabla se determina la longitud de los tubos de los marcos restando la medida de las cantoneras a la longitud total:

	a (vertical)	b (horizontal)	Piezas
Longitud total	2591 mm	2438 mm	
Cantonera	118 mm	162 mm	2
Longitud tubo	2355 mm	2114	

Tabla 14: Cálculo de la longitud de los marcos. Fuente propia.

1.9.1.3. Refuerzos.

Los refuerzos superiores de los marcos se han considerado cuatro tubos cuadrados de 140 x 140 x 5 mm con una longitud de 1214 mm cada uno.

Los refuerzos inferiores son también de tubo cuadrado de 140 x 140 x 5 mm con una longitud de 960 mm.

En los largueros, se consideran ocho refuerzos de tubo cuadrado de 100 x 50 mm con un espesor de 3 mm. La medida de estos se estima en 1328 mm.

En la cara inferior la estructura sufre más esfuerzos, ya que la sujeción del contenedor se ubica en las cantoneras inferiores. Por consiguiente, se colocarán cuatro tubos cuadrados de 70 x 70 x 5 mm. La longitud será de 1266 mm.

1.9.2. Dimensionamiento de la cisterna.

Para dimensionar la cisterna se tienen en cuenta las siguientes limitaciones iniciales:

- La cisterna está situada dentro de una estructura con forma de paralelepípedo (contenedor ISO 1CC) con unas medidas fijadas por la norma ISO 668. Las medidas son 6058 x 2438 x 2591 mm.
- Según el IMDG y el ADR las cisternas que contienen HF no deben tener aperturas en los fondos. La boca de hombre estará centrada en la generatriz superior de la virola.
- Las válvulas que van situadas en la boca de hombre no deben sobrepasar la altura de las cantoneras de la estructura y además tendrán un margen de al menos 30 mm.
- La parte inferior de la cisterna deberá tener al menos un margen de 25 mm con la línea exterior de las cantoneras inferiores. (ISO 1496-3)
- Por el resto de las caras no deberá sobresalir y se propone poner un margen como mínimo de 25 mm.
- El peso del contenedor no debe superar el peso máximo autorizado por el código de la circulación por carretera.
- El peso del contenedor debe ser inferior o igual al rating impuesto por la norma ISO 668.

1.9.2.1. Diámetro.

Con el programa Rhinoceros se dibuja un paralelepípedo de las medidas de un contenedor ISO 1CC. Para determinar el diámetro se considera que se está trabajando con diámetros interiores, por lo que en el momento de determinar la posición de la cisterna en el contenedor se tienen en cuenta un espesor máximo de 12 mm.

Considerando un diámetro interior de 2300 mm se comprueba que cumple las limitaciones expuestas anteriormente:

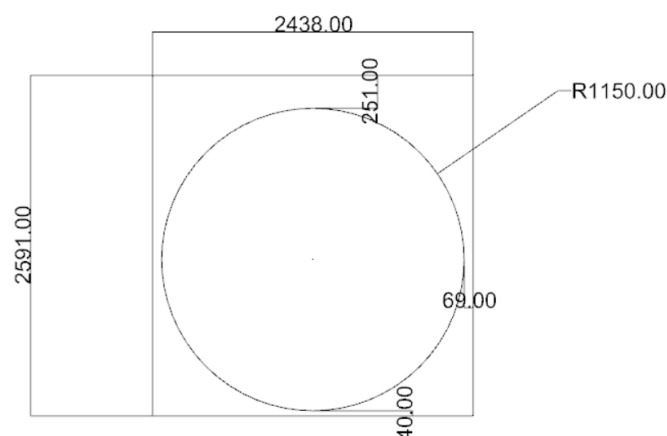


Figura 21: Alzado acotado. Fuente propia.

En la cara inferior suponiendo un espesor máximo de 12 mm se cuentan con 28 mm, que son suficientes conforme al mínimo de la norma que es 25 mm.

Los 69 mm de margen por las dos caras laterales son aptos teniendo también en cuenta un espesor de 12 mm.

En la cara superior, teniendo en cuenta la altura de la válvula más alta una vez colocada (192 mm) y el espesor máximo de 12 mm, se verifica que el margen de 30 mm se cumple:

$$251 - (192 + 12) = 47 \text{ mm}$$

1.9.2.2. Fondos.

Conforme al punto 6.3.3.2. de la norma EN 14025 los fondos que deben aplicarse a la cisterna pueden ser hemisféricos, toroidales o elipsoidales. Siendo uno de los objetivos principales la máxima capacidad de almacenaje de la cisterna, se busca hacer la virola lo más extensa posible y un fondo con la menor flecha realizable. Entre los fondos propuestos, el que menos flecha tiene y por lo tanto permitirá una mayor longitud del cilindro y un mayor volumen es el fondo toroidal.

Existen dos casos particulares de los fondos toroidales que son tipo Kloepper y tipo Korbogen. Se escoge la opción de fondos toroidales tipo Kloepper que tienen las siguientes características:

$$R/D_e = 1$$

$$r/D_e = 0,1$$

A continuación, se muestran las dimensiones del fondo:

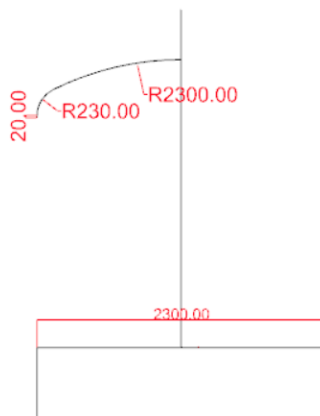


Figura 22: Dimensiones del fondo Kloepper. Fuente propia.

Como se puede observar, se deja un faldón de 20 mm para facilitar la unión con el cilindro y además se cumplen las características de un fondo toroidal tipo Kloepper.

Para completar el dimensionamiento del fondo, con la opción revolución respecto al eje vertical se termina de dibujar el fondo para así poder determinar la flecha.

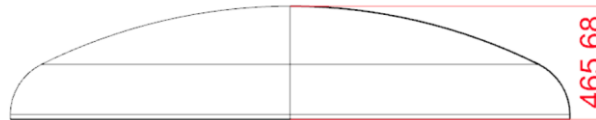


Figura 23: Medida flecha del fondo. Fuente propia.

Para los fondos se pone un espesor de 12 mm cuya validez se comprueba mediante los cálculos que exigen las normas.

1.9.2.3. Virola.

Se determina la longitud de la virola de manera que, con los fondos colocados, quede un margen de al menos de 40 mm sin tener en cuenta el espesor. Por lo que la longitud de la virola se calcula de la siguiente manera:

$$6058 - (2 \times 465,68 + 2 \times 40) = 5046,64 \text{ mm}$$

Para la virola se pone un espesor de 12 mm cuya validez se comprueba mediante los cálculos que exigen las normas.

1.9.2.4. Dimensiones generales.

En la siguiente tabla se resumen las medidas principales del dimensionamiento inicial de la cisterna, considerando que son medidas interiores, es decir, sin espesor:

Diámetro interior	2300 mm
Longitud total	5974 mm
Longitud cilindro	5046,64 mm
Flecha del fondo	465,68 mm
Volumen	23,525 m ³

Tabla 15: Dimensiones generales recipiente. Fuente propia.

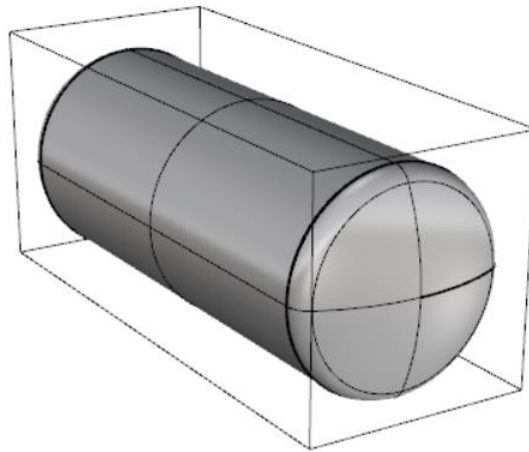


Figura 24: Dibujo dimensionamiento. Fuente propia.

1.9.2.5. Brida de la boca de hombre.

El ADR/IMDG en el punto 6.7.2.5.3. menciona que: *todas las cisternas portátiles deberán estar provistas de bocas de hombre o de otras aberturas de inspección suficientemente grandes para permitir una inspección y un acceso adecuados para el mantenimiento y la reparación del interior. Las cisternas con compartimentos deberán estar provistas de una boca de hombre o de otras aberturas para la inspección de cada compartimento.*

De manera que, en el diseño que se lleva a cabo, solo es necesaria una abertura de inspección que permita el acceso para el mantenimiento y la reparación del interior.

La dimensión necesaria de la brida para la incorporación posterior de la tapa y las válvulas es la siguiente:

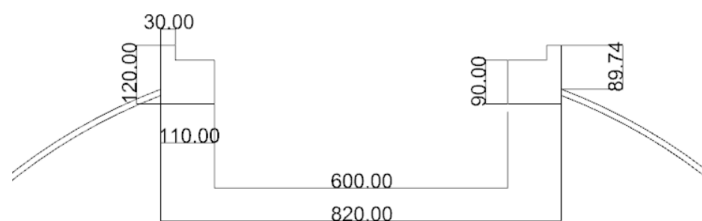


Figura 25: Dimensiones boca de hombre. Fuente propia.

1.9.2.6. Tapa de la boca de hombre.

La tapa de la boca de hombre ha de tener espacio suficiente para contener las cuatro válvulas previamente nombradas. Se ha diseñado en función de la colocación y los diámetros de las válvulas con datos del fabricante.

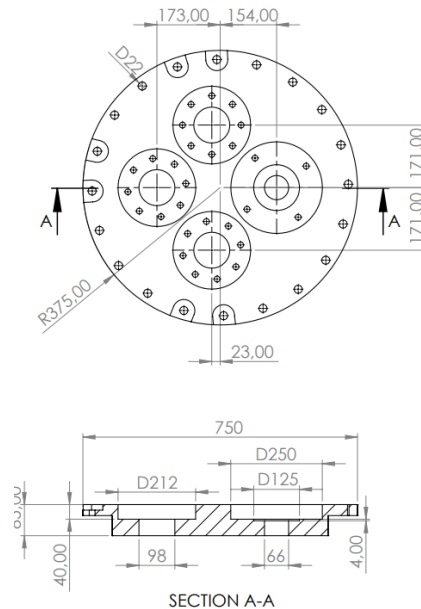


Figura 26: Planta y sección de la tapa acotada. Fuente propia.

1.9.2.7. Tubo buzo.

Para hacer posible la descarga de la parte líquida de la sustancia al completo se colocan dos tubos buzo en las válvulas de fase líquida.

1.9.2.8. Unión de la cisterna a la estructura.

La unión de la cisterna con la estructura consiste en un cono a cada extremo de la cisterna soldado a la misma y a los refuerzos del marco. En la parte superior del marco es necesario colocar una chapa para poder soldar el cono, ya que esa zona no dispone de refuerzos para poder realizar la unión.

Por tanto, se suelda la chapa en forma de U al marco y ésta se suelda al cono. Ambas piezas tienen 12 mm de espesor y son las que se muestran en las siguientes imágenes:

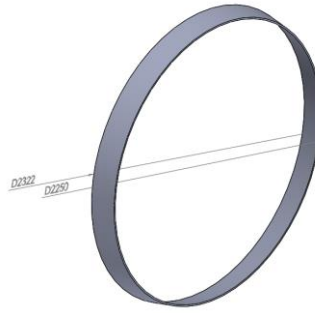


Figura 27: Cono de unión. Fuente propia.

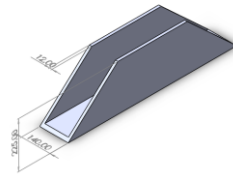


Figura 28: Chapa de unión. Fuente propia.

1.9.2.9. Domo.

Con el fin de proteger las válvulas de posibles golpes y accidentes de coloca un domo de acero con función de tapa. Éste se mecaniza en una empresa especializada en mecanizado:

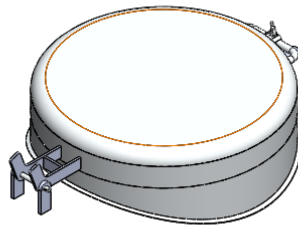


Figura 29: Domo. Fuente propia.

1.9.3. Peso de la estructura.

Para determinar el peso de la estructura, se calculan los volúmenes de acero a partir de los datos estimados y la densidad media del acero.

$$\text{Peso} = \text{Volumen} \cdot \text{Piezas} \cdot \rho_{\text{acero}}$$

Marco	Medida (mm)	Piezas	Área (mm ²)	Longitud (mm)	Volumen (mm ³)	ρ_{acero} (kg/mm ³)	Peso (kg)
Vertical	140 x 140 x 5	4	1375	2355	3238125	$7,85 \cdot 10^{-9}$	101,7
Horizontal	140 x 80 x 4	4	864	2114	1826496	$7,85 \cdot 10^{-9}$	57,4
Refuerzo	140 x 140 x 5	4	1375	1214	1375000	$7,85 \cdot 10^{-9}$	52,4
Refuerzo	140 x 140 x 5	4	960	1214	1375000	$7,85 \cdot 10^{-9}$	41,5

Larguero	Medida (mm)	Piezas	Área (mm ²)	Longitud (mm)	Volumen (mm ³)	ρ_{acero} (kg/mm ³)	Peso (kg)
Superior	100 x 100 x 3	2	591	5702	3369882	$7,85 \cdot 10^{-9}$	52,9
Inferior	IPE 220	2	3213,5	5702	18317675	$7,85 \cdot 10^{-9}$	143,8
Refuerzo	100 x 50 x 3	8	441	1000	441000	$7,85 \cdot 10^{-9}$	36,8

Refuerzo inferior	Medida (mm)	Piezas	Área (mm ²)	Longitud (mm)	Volumen (mm ³)	ρ_{acero} (kg/mm ³)	Peso (kg)
	170 x 170 x 5	4	1675	1266	2120550	$7,85 \cdot 10^{-9}$	66,6

Cantoneras	Piezas	Peso/ ud.(kg)	Peso (kg)
	8	11	88

Pestructura	624,4 kg
-------------	----------

Tabla 16: Cálculo del peso de la estructura. Fuente propia.

1.9.4. Peso de la cisterna.

Para empezar, se calcula el peso de la cisterna, es decir, los fondos más la virola. Se obtienen los siguientes datos del programa de dibujo Rhinoceros:

Espesor máximo estimado	12 mm
Área virola	35781311,3 mm ²
Área fondo	5153181,4 mm ²

Tabla 17: Dimensiones cisterna. Fuente propia.

Con los datos anteriores, considerando un espesor de los fondos y la virola de 12 mm, se calcula el volumen de acero total de la cisterna:

$$V_{\text{virola}} = A_{\text{virola}} \cdot e = 429375735,6 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{fondos}} = 2 \cdot A_{\text{fondo}} \cdot e = 123676353,1 \text{ mm}^3$$

$$V_{\text{cisterna}} = V_{\text{virola}} + V_{\text{fondos}} = 553052088,7 \text{ mm}^3 = 0,553 \text{ m}^3$$

Partiendo de la densidad media del acero, se calcula el peso total de la cisterna:

Densidad del acero (ρ_{acero})	7,85 t/m ³
--	-----------------------

$$P_{\text{cisterna}} = V_{\text{cisterna}} \cdot \rho_{\text{acero}} = 4,34 \text{ t}$$

1.9.5. Comprobación.

En este apartado se comprobará si las dimensiones estimadas cumplen con la normativa de transporte por carretera y si supera o no el rating del contenedor impuesto por la ISO 1496-3.

La normativa de transporte limita el peso máximo autorizado para semirremolques con 5 ejes, en este caso dos en la cabeza tractora y tres en la plataforma de remolque. El peso máximo autorizado para este tipo de semirremolques es 40 y 44 toneladas por carretera e intermodal, respectivamente.

El rating del contenedor, como ya ha sido comentado anteriormente, es de 30,48 toneladas.

Se estima un peso de la tapa de la boca de hombre, la brida, el cono, la chapa de unión del cono, las escaleras, las pasarelas y las válvulas de 1200 kg

Una vez calculado el peso aproximado del contenedor con las medidas estimadas, se compara con la normativa. Para ello se parte de los siguientes datos:

	Intermodal	Carretera
PMA (t)	44	40
Camión (t)	7	7
Plataforma (t)	3,5	3,5
Estructura (t)	0,6	0,6
Cisterna (t)	4,3	4,3
Equipos (t)	1,2	1,2
Carga útil (t)	27,4	23,4
Densidad HF (t/m³)	1	1
Grado de llenado	0,84 kg/l	0,84 kg/l
Volumen máx. (l)	23525	23525

Tara del contenedor	6,1 t
----------------------------	--------------

Tabla 18: Pesos del modelo. Fuente propia.

El peso de la cabeza tractora y la plataforma se han estimado haciendo una comparativa entre empresas que venden este tipo de maquinaria.

La carga útil resulta de la operación de restar el peso total (camión, plataforma, estructura y cisterna) a el peso máximo autorizado (PMA).

Sin embargo, no es posible llegar a ese valor de carga con el volumen máximo de diseño; la carga máxima será entonces:

$$\text{Volumen(l)} \cdot \text{Grado de llenado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right) = 23535 \cdot 0,84 = 19761 \text{ kg}$$

La suma del peso de la cisterna, la estructura y la carga útil, aplicando el grado de llenado correspondiente, no debe sobrepasar el rating del contenedor impuesto por la ISO 1496-3:

$$\text{Peso máximo contenedor} = \text{contenedor} + \text{carga máxima}$$

Rating ISO 1CC	30480 kg
Peso máximo contenedor	25861 kg

Tabla 19: Características del contenedor. Fuente propia.

La suma del camión, la plataforma y el contenedor al 84 % no debe sobrepasar el peso máximo autorizado por la normativa de transporte por carretera:

$$\text{Peso total} = \text{camión} + \text{plataforma} + \text{contenedor} + \text{carga máxima}$$

	Intermodal	Carretera
PMA (t)	44	40
Peso total (t)	36,4	36,4

Tabla 20: Peso total. Fuente propia.

Se ha confirmado que el dimensionamiento inicial del proyecto cumple con la normativa de pesos y dimensiones.

1.10. Selección del material.

La selección del material se realiza a partir del cumplimiento de una serie de normas. Para ello, primero se lleva a cabo la elección de un material y posteriormente, se comprueba que cumple con la normativa. Los materiales elegidos serán dos; para la cisterna y para la estructura.

1.10.1. Cisterna.

Para empezar, se tienen en cuenta la siguiente disposición del ADR para seleccionar el material de la cisterna:

6.8.5.1. Los depósitos destinados al transporte del N° ONU 1052 fluoruro de hidrógeno anhidro y del N° ONU 1790 ácido fluorhídrico que contenga más de un 85% de fluoruro de hidrógeno, de la clase 8, se construirán de acero.

Por tanto, se establece el acero como el tipo de material que se utilizará para la construcción. A fin de optar por una clase de acero u otra, se emplea la norma “UNE-EN 10028-3: Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 3: Aceros soldables de grano fino en condiciones de normalizado.”

A partir de ésta, se selecciona el acero P355NL1.

En la siguiente tabla, se expone la composición química del acero propuesto:

Designación del acero		Composición química (análisis de colada)*													
Simbólica	Numérica	% en masa													
		C	Si	Mn	P	S	Al _{total}	N	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
		máx.	máx.		máx.	máx.	mín.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
P275NH	1.0487	0,16	0,40	0,80 ^b a	0,025	0,015	0,020 ^{c,d}	0,012	0,30 ^e	0,30 ^e	0,08 ^e	0,05	0,50	0,03	0,05
P275NL1	1.0488			1,50											
P275NL2	1.1104				0,020	0,010									
P355N	1.0562														
P355NH	1.0565	0,18	0,50	1,10 ^a	0,025	0,015	0,020 ^{c,d}	0,012	0,30 ^e	0,30 ^e	0,08 ^e	0,05	0,50	0,03	0,10
P355NL1	1.0566			1,70											0,12
P355NL2	1.1106				0,020	0,010									
P460NH	1.8935			1,10	0,025	0,015	0,020 ^{c,d}	0,025	0,30	0,70 ^f	0,10	0,05	0,80	0,03	0,20
P460NL1	1.8915	0,20	0,60	a											0,22
P460NL2	1.8918			1,70	0,020	0,010									

* Los elementos que no figuran en esta tabla no deben añadirse voluntariamente en la composición del acero sin previo acuerdo con el cliente, con la excepción de aquellos destinados a la finalización de la colada. Se deben tomar las debidas precauciones para evitar la adición de elementos durante el proceso de fabricación que puedan afectar a las características mecánicas y la adecuación del acero.

^b Para los espesores de producto < 6 mm, es admisible un contenido mínimo en manganeso del 0,60%.

^c El contenido en Al_{total} puede disminuir respecto de este mínimo, si se ha utilizado niobio, titanio o vanadio como elementos fijadores de nitrógeno.

^d Si solo se utiliza aluminio para fijar el nitrógeno, debe aplicarse un ratio $\frac{Al}{N} \geq 2$.

^e La suma de porcentajes en masa de los tres elementos cromo, cobre y molibdeno no debe exceder de 0,45%.

^f Si el porcentaje en masa de cobre supera el 0,30%, el porcentaje en masa de níquel debe ser al menos igual a la mitad del porcentaje en masa de cobre.

Tabla 21: Composición química. Fuente: UNE EN 10028-3

1.10.1.1. Cumplimiento de la normativa del ADR y IMDG.

Las disposiciones del ADR relativas a los materiales utilizados para el diseño de cisternas son las siguientes:

- 6.8.2.1.8 Los depósitos se fabricarán con materiales metálicos adecuados que, salvo que otros intervalos de temperatura no estén previstos en las distintas clases, deben ser insensibles a la rotura frágil y a la corrosión con fisuras bajo tensión, a temperaturas entre -20 °C y +50 °C (ADR).
- 6.7.2.2.1. Al elegir el material deberá tenerse en cuenta la gama de temperaturas de cálculo con respecto al riesgo de fractura frágil bajo tensión, la aparición de fisuras por corrosión y la resistencia a los impactos (IMDG).

El P355NL1 es un acero de grano fino que no presenta rotura frágil ni corrosión con fisuras bajo tensión debido a sus características elásticas entre los -40°C y los +50°C.

- 6.8.2.1.9 Los materiales de los depósitos y sus revestimientos de protección en contacto con el contenido, carecerán de materias susceptibles de reaccionar

peligrosamente (véase “reacción peligrosa” en 1.2.1) con el contenido, de formar productos peligrosos o de debilitar el material de modo apreciable, bajo el efecto del mismo.

Si el contacto entre el producto transportado y el material utilizado para la fabricación del depósito ocasionara una disminución progresiva del espesor de éste, al fabricarlo, se deberá aumentar el espesor en una magnitud adecuada. Este sobre espesor de corrosión, no se tendrá en cuenta para calcular el espesor del depósito (ADR).

6.7.2.2.7 Los materiales de que esté hecha la cisterna portátil, incluidos los de cualesquiera dispositivos, juntas, forros y accesorios, no deberán tener un efecto adverso en la(s) sustancia(s) que ha(n) de transportarse (IMDG).

6.7.2.2.2 Los depósitos de las cisternas portátiles, sus accesorios y sus tuberías deberán estar fabricados con materiales que: .1 sean prácticamente inatacables por la(s) sustancia(s) transportada(s); .2 sean eficazmente pasivados o neutralizados por reacción química; o .3 estén revestidos de otro material resistente a la corrosión directamente adherido al depósito, o fijado por otro método equivalente (IMDG).

Respecto al primer párrafo, la ficha de seguridad del New Jersey Department of Health, se refiere al fluoruro de hidrógeno como una sustancia que reacciona con aceros para producir hidrógeno gaseoso, que es inflamable y explosivo. Sin embargo, el P355NL1 es un acero de grano fino, por lo que cuenta con una estructura cristalina muy densa que evita reacción y producción interlaminar de hidrógeno gaseoso.

El fluoruro de hidrógeno es corrosivo, por lo tanto, ocasionará una disminución progresiva del espesor del material, por lo que en el diseño definitivo se aplicará un sobre espesor de corrosión.

- *6.8.2.1.10. Para los depósitos soldados, sólo se utilizarán materiales de un perfecto comportamiento a la soldadura y para los que se pueda garantizar un valor satisfactorio de resiliencia a una temperatura ambiente de -20 °C, de modo especial en las juntas soldadas y en las zonas adyacentes a ellas.*

En caso de empleo de acero de grano fino, se debe garantizar que el límite de elasticidad R_e no tenga un valor superior a 460 N/mm² y que el límite superior de resistencia a la tracción R_m no tenga un valor superior a 725 N/mm², de acuerdo con las especificaciones del material (ADR).

6.7.2.2.1. Para los depósitos soldados sólo deberá utilizarse un material cuya soldabilidad esté plenamente demostrada. Las soldaduras deberán estar bien hechas y ofrecer total seguridad.

Cuando se utilice acero de grano fino, el valor garantizado del límite de fluencia no deberá superar los 460 N/mm², y el valor garantizado del límite superior de la resistencia a la tracción no deberá ser superior a 725 N/mm² según la especificación del material (IMDG).

El P355NL1 está incluido entre los aceros soldables de grano fino en condiciones de normalizado en la norma UNE EN 10028, por lo tanto, es un material perfectamente soldable.

De la Tabla 4 de la norma UNE EN 10028 pueden extraerse los siguientes datos para un espesor ≤ 16 mm:

P355NL1	Límite elástico, R_e (MPa)	Resistencia a la tracción, R_m (MPa)	Alargamiento, A (%)
	355	490 a 630	22

Tabla 22: Propiedades mecánicas. Fuente UNE EN 10028.

Por lo tanto, en referencia al segundo párrafo de los puntos 6.8.2.1.10. y 6.7.2.2.1.:

$$R_e \leq 460 \text{ N/mm}^2$$

$$R_{mMAX} \leq 725 \text{ N/mm}^2$$

- 6.8.2.1.11 Los aceros con una relación R_e/R_m superior a 0,85 no son admisibles para su empleo en la fabricación de depósitos soldados (ADR).
6.7.2.3.3.2 No se permitirá la construcción de depósitos soldados con aceros que tengan una relación R_e/R_m de más de 0,85. (IMDG).

Empleando los datos anteriores, se hace la siguiente comprobación:

$$R_e/R_m = 355/490 = 0,72 < 0,85$$

- 6.8.2.1.12 Para el acero, el alargamiento a la rotura, en tanto por ciento, corresponderá como mínimo al valor $\frac{10000}{\text{Resistencia a la rotura por tracción en N/mm}^2}$ pero en ningún caso será inferior a un 16% para aceros de grano fino ni a un 20% para los restantes aceros (ADR).
6.7.2.3.3.3 Los aceros utilizados en la construcción de depósitos deben tener un alargamiento porcentual en la rotura de por lo menos $10\,000/R_m$ con un mínimo absoluto del 16 % en el caso de los aceros de grano fino y del 20 % en el de los demás aceros (IMDG).

Se verifica que se cumple la norma:

$$\frac{10000}{\text{Resistencia a la rotura por tracción en N/mm}^2} = \frac{10000}{490} = 20,41 \% > 16 \%$$

De acuerdo con norma ADR en el punto 6.5.5.1.1., los depósitos de acero de grano fino destinados al transporte de fluoruro de hidrógeno anhidro se tratarán térmicamente para aliviar las tensiones térmicas.

1.10.2. Estructura.

El material del que estará compuesto la estructura se determina a través de la siguiente norma:

UNE-EN 10025-2. Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.

Será un acero estructural del tipo S275J2 con la siguiente composición química:

Tabla 4 – Composición química del análisis de producto, basada en la tabla 2^a

Designación		Estado de desoxidación b	C en % máx. para espesor nominal del producto en mm			Si % máx.	Mn % máx.	P % máx. d	S % máx. d, e	N % máx. f	Cu % máx. g	Otro % máx. h
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ^c							
S235JR	1.0038	FN	0,19	0,19	0,23	–	1,50	0,045	0,045	0,014	0,60	–
S235J0	1.0114	FN	0,19	0,19	0,19	–	1,50	0,040	0,040	0,014	0,60	–
S235J2	1.0117	FF	0,19	0,19	0,19	–	1,50	0,035	0,035	–	0,60	–
S275JR	1.0044	FN	0,24	0,24	0,25	–	1,60	0,045	0,045	0,014	0,60	–
S275J0	1.0143	FN	0,21	0,21	0,21 ⁱ	–	1,60	0,040	0,040	0,014	0,60	–
S275J2	1.0145	FF	0,21	0,21	0,21 ⁱ	–	1,60	0,035	0,035	–	0,60	–
S355JR	1.0045	FN	0,27	0,27	0,27	0,60	1,70	0,045	0,045	0,014	0,60	–
S355J0	1.0553	FN	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,040	0,040	0,014	0,60	–
S355J2	1.0577	FF	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	–	0,60	–
S355K2	1.0596	FF	0,23 ^j	0,23 ^k	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	–	0,60	–
S450J0 ^l	1.0590	FF	0,23	0,23 ^k	0,24	0,60	1,80	0,040	0,040	0,027	0,60	^m

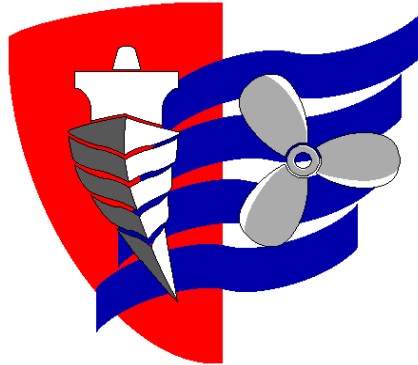
Tabla 23: Composición química. Fuente: EN 10025-2

En la siguiente tabla se exponen las propiedades mecánicas a temperatura ambiente del acero S275J2 para un espesor ≤ 16:

S275J2	Límite elástico, R _e (MPa)	Resistencia a la tracción, R _m (MPa)	Alargamiento, A (%)
	275	430 a 580	21

Tabla 24: Propiedades mecánicas. Fuente: EN 10025-2.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



CÁLCULOS

Documento 2

Trabajo de fin de grado

Ingeniería Marítima

- 2. Cálculos..... 45
 - 2.1. Cálculo de presiones..... 45
 - 2.2. Cálculo de espesores. 52
 - 2.2.1. Virola..... 52
 - 2.2.2. Espesor de los fondos..... 59
 - 2.3. Aberturas de la envolvente..... 63
 - 2.4. Tapa de la boca de hombre. 67
 - 2.5. Cálculo de la presión externa. 71
 - 2.6. Caudal mínimo de la válvula de seguridad..... 79

2. Cálculos.

2.1. Cálculo de presiones.

Las normas ADR y IMDG definen la presión de servicio, la presión de cálculo y la presión de prueba (6.7.2.1.):

- Presión de servicio: la mayor de las siguientes presiones, medidas en el punto más alto del depósito en su posición de explotación.

1. *La presión manométrica efectiva máxima autorizada en el depósito durante el llenado o el vaciado.*

Las bombas de carga y descarga que utiliza la empresa Derivados del Flúor son de 3 bar. Por lo que se utilizará este valor como valor de la presión de llenado y vaciado.

Presión de llenado/vaciado = 3 bar

2. *La presión manométrica efectiva máxima para la cual se haya diseñado el depósito, que no deberá ser inferior a la suma:*

- a) *de la presión de vapor absoluta (en bar) de la materia a 65 °C menos 1 bar.*

El valor de la presión de vapor absoluta se extrae del siguiente gráfico, partiendo de los datos:

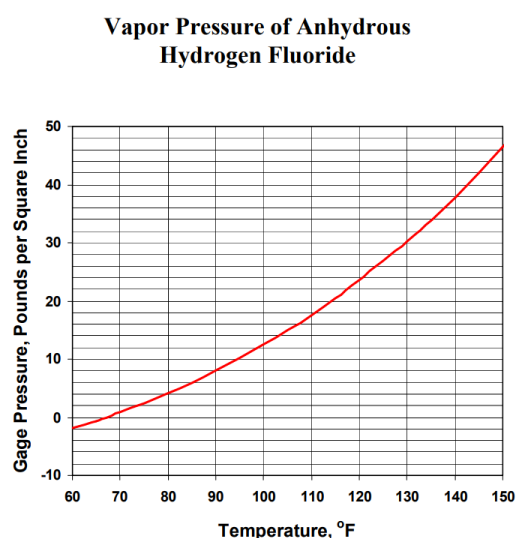


Figura 30: Presión de vapor en función de la temperatura. Fuente: Honeywell.

65°C	=	149°F
------	---	-------

De la gráfica se extrae que para 149°F, la presión de vapor manométrica es de 46 psi, o lo que es lo mismo 3,17 bar.

No es necesario restar 1 bar al valor de la gráfica como dice la norma, ya que el extraído es directamente el valor manométrico de la presión de vapor. Por lo tanto:

Presión de vapor absoluta = 3,17 bar

b) de la presión parcial (en bar) del aire o de otros gases en el espacio no llenado, tal como resulte determinada por una temperatura del espacio no llenado de 65 °C como máximo y una dilatación del líquido debida a la elevación de la temperatura media del contenido de $t_r - t_f$ (t_f = temperatura de llenado, es decir, habitualmente 15 °C, t_r = temperatura máxima media del contenido, 50 °C).

Para hacer el cálculo de la presión parcial tras la dilatación del líquido, se parte de los siguientes datos:

Volumen total	23525 l
Grado de llenado	0,84 kg/l
ρ HF a 15°C	1,0 kg/l
ρ HF a 50°C	0,9 kg/l

Tabla 25: Datos para calcular la presión parcial. Fuente: Figura 30.

Se determina el volumen del líquido cuando la temperatura es de 15°C y 50°C:

$$V_{15} = \frac{\text{Volumen total (l)} \cdot \text{Grado de llenado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)}{\rho_{\text{HF a } 15^\circ\text{C}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)} = 19761,0 \text{ l}$$

$$V_{50} = \frac{\text{Volumen total (l)} \cdot \text{Grado de llenado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)}{\rho_{\text{HF a } 50^\circ\text{C}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)} = 21956,7 \text{ l}$$

El líquido dilata debido al aumento de la temperatura, por lo que el espacio de volumen donde se forma la fase gaseosa de la sustancia disminuye:

$$V - V_{15} = 3764,0 \text{ l}$$

$$V - V_{50} = 1568,3 \text{ l}$$

Al estar el líquido a temperatura ambiente (15°C) se considera como presión absoluta la presión atmosférica. Se aplica la ley de los gases ideales por lo que:

$$k = P \cdot V$$

$$k = P_{15} \cdot V_{15}$$

$$k = P_{50} \cdot V_{50}$$

Por lo tanto:

$$P_{15} \cdot V_{15} = P_{50} \cdot V_{50}$$

$$P_{50} = \frac{P_{15} \cdot V_{15}}{V_{50}} = 1,4 \text{ bar}$$

Se está trabajando con presiones manométricas y P_{50} es absoluta, por lo que se le resta 1 bar de la presión atmosférica:

$$P_{50} = 0,4 \text{ bar}$$

La suma de las dos presiones anteriormente calculadas es:

$$\text{Presión de vapor absoluta} + \text{Presión parcial } (t_{15}-t_{50}) = 4,57 \text{ bar}$$

Presión 1	3 bar
Presión 2	4,57 bar

Según la norma, la presión de servicio es la mayor de las presiones calculadas en los apartados a) y b):

Presión de servicio

4,57 bar

- Presión de cálculo: es la que se debe de utilizar en los cálculos según un código de diseño para recipientes a presión. La presión de cálculo debe ser la mayor de las siguientes:

1. *La presión manométrica efectiva máxima autorizada en el depósito durante el llenado o el vaciado.*

Como ha sido mencionado anteriormente, se utilizará el valor de la presión que utiliza la empresa Derivados del Flúor para llenar o vaciar las cisternas.

Presión de llenado/vaciado = 3 bar

2. *La suma de:*

- a) *La presión de vapor absoluta (en bar) de la sustancia a 65 °C (o a la temperatura máxima alcanzada durante el llenado, el vaciado o el transporte para sustancias que se transportan a más de 65 °C), menos 1 bar.*

El valor de la presión de vapor absoluta se extrae del siguiente gráfico, partiendo de los datos:

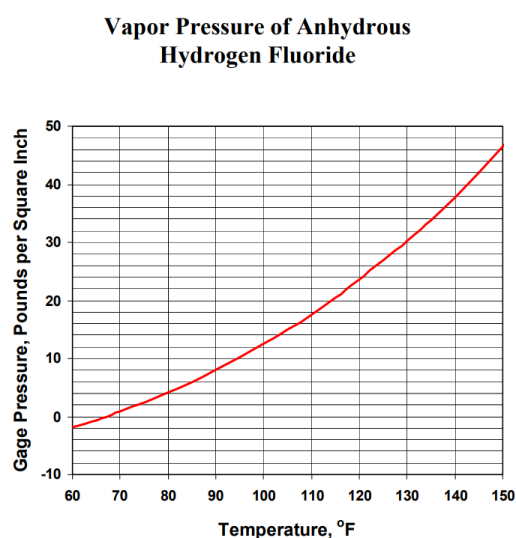


Figura 31: Presión de vapor en función de la temperatura. Fuente: Honeywell.

65°C = 149°F

De la gráfica se extrae que para 149°F, la presión de vapor manométrica es de 46 psi, o lo que es lo mismo 3,17 bar.

No es necesario restar 1 bar al valor de la gráfica como dice la norma, ya que el extraído es directamente el valor manométrico de la presión de vapor. Por lo tanto:

Presión de vapor absoluta = 3,17 bar

- b) La presión parcial (en bar) del aire o de otros gases en el espacio no llenado, tal como resulte determinada por una temperatura del espacio no llenado de 65 °C con un máximo y una dilatación del líquido debida a la elevación de la temperatura media del contenido de $t_r - t_f$ (t_f = temperatura de llenado, es decir, habitualmente 15 °C, t_r = temperatura máxima media del contenido, 50 °C).*

Para hacer el cálculo de la presión parcial tras la dilatación del líquido, se parte de los siguientes datos:

Volumen total	23525 l
Grado de llenado	0,84 kg/l
ρ HF a 15°C	1,0 kg/l
ρ HF a 50°C	0,9 kg/l

Tabla 26: Datos para calcular la presión parcial. Fuente: Figura 31.

Se determina el volumen del líquido cuando la temperatura es de 15°C y 50°C:

$$V_{15} = \frac{\text{Volumen total (l)} \cdot \text{Grado de llenado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)}{\rho_{\text{HF a } 15^\circ\text{C}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)} = 19761,0 \text{ l}$$

$$V_{50} = \frac{\text{Volumen total (l)} \cdot \text{Grado de llenado} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)}{\rho_{\text{HF a } 50^\circ\text{C}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)} = 21956,7 \text{ l}$$

El líquido dilata debido al aumento de la temperatura, por lo que el espacio de volumen donde se forma la fase gaseosa de la sustancia disminuye:

$$V - V_{15} = 3764,0 \text{ l}$$

$$V - V_{50} = 1568,3 \text{ l}$$

Al estar el líquido a temperatura ambiente (15°C) se considera como presión absoluta la presión atmosférica. Se aplica la ley de los gases ideales por lo que:

$$k = P \cdot V$$

$$k = P_{15} \cdot V_{15}$$

$$k = P_{50} \cdot V_{50}$$

Por lo tanto:

$$P_{15} \cdot V_{15} = P_{50} \cdot V_{50}$$

$$P_{50} = \frac{P_{15} \cdot V_{15}}{V_{50}} = 1,4 \text{ bar}$$

Se está trabajando con presiones manométricas y P_{50} es absoluta, por lo que se le resta 1 bar de la presión atmosférica:

$$P_{50} = 0,4 \text{ bar}$$

- c) Una presión hidrostática calculada de acuerdo con las fuerzas estáticas especificadas en 6.7.2.2.12, pero igual como mínimo a 0,35 bar.

La presión hidrostática se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$P_h = \rho \cdot g \cdot D_i$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del líquido (HF) y D_i es el diámetro interior de la cisterna, que se comporta como la altura del líquido.

A partir de los siguientes datos se calcula la presión hidrostática:

$g \text{ (m/s}^2\text{)}$	9,81
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1000
	2,3

Tabla 27: Datos para calcular la presión hidrostática. Fuente propia.

$$P_h = 22563 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$$

$$P_h = 0,23 \text{ bar}$$

La disposición de la norma es que la presión hidrostática calculada no debe ser menor que 0,35 y en este caso lo es, por lo que se determina como presión hidrostática el valor de 0,35 bar.

$$P_h = 0,35 \text{ bar}$$

La suma de las presiones calculadas en los apartados a), b) y c) es:

$$\text{Presión de vapor absoluta} + \text{Presión parcial } (t_{15}-t_{50}) + P_h = 3,92 \text{ bar}$$

3. Las dos terceras partes de la presión mínima de ensayo indicada en la instrucción pertinente sobre cisternas portátiles de 4.2.5.2.6.

La presión mínima de ensayo para una instrucción T20 es 10 bar.

$$2/3 \text{ de } 10 = 6,67 \text{ bar}$$

La presión de cálculo es la mayor de las siguientes:

Presión 1	3 bar
Presión 2	3,92 bar
Presión 3	6,67 bar

Por lo tanto:

Presión de cálculo
6,67 bar

- Presión de prueba/ensayo: la presión manométrica máxima en la parte superior del depósito, medida durante el ensayo de presión hidráulica, al menos igual a la presión de cálculo multiplicada por 1,5. La presión mínima de ensayo para las cisternas portátiles destinadas a determinadas sustancias se indica en la instrucción pertinente sobre cisternas portátiles de 4.2.5.2.6.

La presión que se indica en la instrucción T20 sobre cisternas portátiles es de 10 bar.

La presión de cálculo multiplicada por 1,5:

$$\text{Presión de cálculo} \cdot 1,5 = 10 \text{ bar}$$

Presión de prueba
10 bar

A continuación, se agrupan los valores calculados anteriormente y se muestra su valor en MPa ya que se aplicará en los siguientes cálculos:

Presión de servicio	Presión de cálculo	Presión de prueba
4,575 bar	6,67 bar	10 bar
0,46 MPa	0,67 MPa	1 MPa

Tabla 28: Valores de las presiones. Fuente propia.

2.2. Cálculo de espesores.

2.2.1. Virola.

La norma ADR en el punto 6.8.2.6.1. remite a la *UNE-EN14025. Cisternas para el transporte de mercancías peligrosas. Cisternas metálicas sometidas a presión. Diseño y construcción.*

9.2.1. Espesor de la pared cilíndrica.

Para comenzar a determinar los espesores de la pared cilíndrica, se aplica el siguiente esquema:

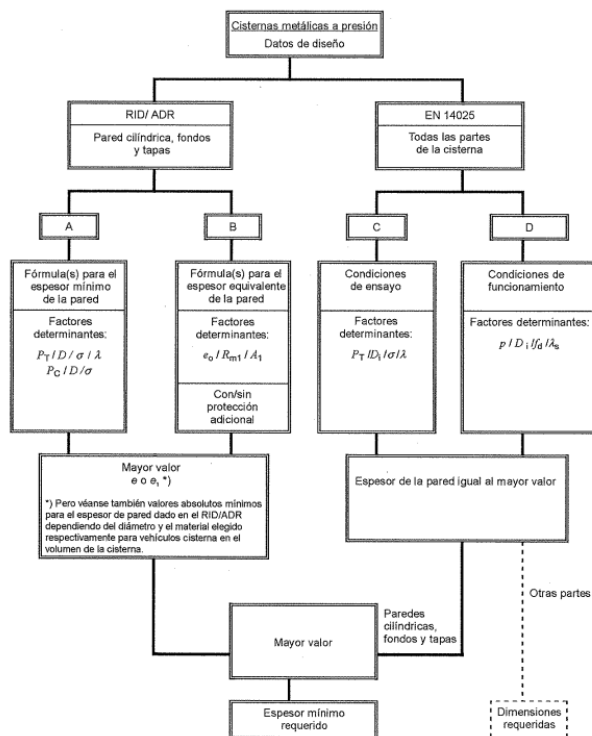


Figura 32: Esquema para determinar el espesor mínimo. Fuente: UNE-EN14025.

Se va a calcular en función de las ramas A, B, C y D, y como se muestra en el esquema, el mayor valor resultante de las cuatro ramas será el espesor mínimo requerido de la pared cilíndrica.

RAMA A

En este caso, se tienen en cuenta las disposiciones del código IMDG y ADR, que coinciden en el método de cálculo del espesor mínimo, por consiguiente, se calculará solamente una vez.

Los datos necesarios para aplicar las fórmulas en la rama A son los siguientes:

- P_p = presión de prueba (Mpa).
- P_{cal} = presión de cálculo (Mpa).
- D_i = diámetro interior.
- σ = tensión.
- λ = coeficiente de soldadura.

P355NL1	Límite elástico, R_e (MPa)	Resistencia a la tracción, R_m (MPa)	Alargamiento, A (%)
	355	490 a 630	22

Tabla 29: Propiedades mecánicas P355NL1. Fuente: EN 10025-2.

De acuerdo con la EN 14025, en las cisternas que transporten sustancias de clase 8, todos los cordones de soldadura sobre toda su longitud deberán ser objeto de controles no destructivos y deberán ser verificadas, tanto como sea posible, visualmente sobre las dos caras.

Según la norma, la tensión será el menor de los siguientes:

$$\sigma \leq 0,75 R_e \text{ ó } \sigma \leq 0,5 R_m$$

$$0,75 \cdot R_e = 266,25 \text{ N/mm}^2$$

$$0,5 \cdot R_m = 245 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 245 \text{ N/mm}^2$$

De acuerdo con la EN 14025, en las cisternas que transporten sustancias de clase 2, y asimilables (Anexo I de la directiva de equipos a presión transportables), todos los cordones de soldadura sobre toda su longitud deberán ser objeto de controles no destructivos y deberán ser verificadas, tanto como sea posible, visualmente sobre las dos caras.

$$\lambda = 1$$

Se agrupan los datos necesarios para realizar el cálculo en la siguiente tabla:

P_p	10 bar	1 Mpa
P_{cal}	6,67 bar	0,67 Mpa
D_i	2300 mm	
σ	245 N/mm ²	
λ	1	

Tabla 30: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

6.8.2.1.17. El espesor del depósito no será menor que el mayor de los valores calculados por las siguientes fórmulas:

$$e = \frac{P_p \cdot D_i}{2 \cdot \sigma \cdot \lambda}$$

$$e = \frac{P_{cal} \cdot D_i}{2 \cdot \sigma}$$

$$e = \frac{1 \cdot 2300}{2 \cdot 245 \cdot 1} = 4,69 \text{ mm}$$

$$e = \frac{0,67 \cdot 2300}{2 \cdot 245} = 3,13 \text{ mm}$$

Espesor mínimo Rama A = 4,69 mm

RAMA B

El método de cálculo de el espesor equivalente del código IMDG coincide una vez más con el método del ADR. Por lo que se realizará una sola vez.

Los datos necesarios son los siguientes:

D_i = diámetro interior en metros.

e_0 = espesor mínimo especificado en la instrucción de transporte en cisternas portátiles.

Rm_1 = resistencia mínima a la tracción garantizada (en N/mm²) del metal utilizado.

A_1 = alargamiento mínimo a la rotura garantizado (en %) del metal utilizado.

El espesor mínimo e_0 para una instrucción de transporte T20 es de 8mm.

$$e_0 = 8 \text{ mm}$$

La resistencia mínima a la tracción del P355NL1 especificada en las propiedades mecánicas del material previamente expuesto es:

$$R_{m1} = 490 \text{ N/mm}^2$$

El alargamiento mínimo a la rotura es el siguiente:

$$A_1 = \frac{10000}{R_m} = 20,41 \%$$

Los datos necesarios reunidos en la siguiente tabla:

e₀	8 mm
R_{m1}	490 N/mm ²
A₁	20,41 %
Di	2300 mm

Tabla 31: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

6.7.2.4.6 El espesor equivalente de un metal distinto del dispuesto para el acero de referencia según 6.7.2.4.2, deberá determinarse utilizando la fórmula siguiente:

$$e = \frac{21,4 \cdot e_0}{\sqrt[3]{R_{m1} \cdot A_1}}$$

El acero de referencia es un acero que propone la norma con una resistencia a la tracción de 370 N/mm² y un alargamiento a la ruptura del 27 %. Al ser el acero que se va a utilizar distinto al de referencia, se aplica la fórmula que exige la norma:

$$e = \frac{21,4 \cdot 8}{\sqrt[3]{490 \cdot 20,41}} = 7,95 \text{ mm}$$

Para el cálculo del espesor equivalente hay que tener en cuenta también el siguiente punto:

6.7.2.4.7 En el caso de que, en la instrucción de transporte de cisternas portátiles aplicable del 4.2.5.2.6, esté especificado un espesor mínimo de 8 mm ó 10 mm, convendrá tener en cuenta que estos espesores se calculan sobre la base de las propiedades del acero de referencia y un diámetro del depósito de 1,80 m. Si se utiliza un metal distinto del acero dulce (véase 6.7.2.1) o si el depósito tiene un diámetro superior a 1,80 m., el espesor deberá determinarse utilizando la fórmula siguiente:

$$e = \frac{21,4 \cdot e_0 \cdot Di}{1,8 \cdot \sqrt[3]{R_{m1} \cdot A_1}}$$

Al estar especificado en la instrucción de transporte un espesor de 8 mm y siendo el diámetro mayor de 1,80 m, hay que aplicar la fórmula:

$$e = \frac{21,4 \cdot 8 \cdot 2,3}{1,8 \cdot \sqrt[3]{490 \cdot 20,41}} = 9,90 \text{ mm}$$

El espesor equivalente resultante de la rama B será el mayor de los dos calculados:

Espesor equivalente rama B = 9,90 mm

RAMA C

Los datos necesarios para determinar el espesor son los siguientes:

- P_p = presión de prueba (Mpa).
- D_i = diámetro interior (mm).
- f_d = tensión en condiciones de ensayo (N/mm^2).
- λ = coeficiente de soldadura.

Para calcular el valor del espesor según la rama C del esquema se utilizan datos en condiciones de ensayo, es decir, la presión de prueba y la tensión que indica la siguiente tabla, que la EN 14025 la nombra como f_d :

	Condiciones de funcionamiento	Condiciones de ensayo
p	MWP pero no menos de $(p_{vap} - 1 \text{ bar}) + p_{dyn}$ si procede ^a	p_{test} ^b
f_d para aceros ferríticos y aleaciones de aluminio	mín. $\{ R_{e,t} / 1,5; R_m / 2,4 \}$	mín. $\{ 0,75 R_e; 0,5 R_m \}$
f_d para aceros austeníticos con $30\% \leq A \leq 35\%$	$R_{e,t} / 1,5$	
f_d para aceros austeníticos $A > 35\%$	máx. $\{ R_{e,t} / 1,5; \text{mín. } (R_{e,t} / 1,2; R_{m,t} / 3) \}$ ^c	
Temperatura de diseño	20 °C siempre que la temperatura de funcionamiento de la cisterna esté en el rango de - 20 °C a + 50 °C. Cuando la temperatura de funcionamiento está fuera de este rango entonces la temperatura de diseño debe tomarse como el valor extremo de la temperatura de funcionamiento.	Temperatura en el ensayo de presión (normalmente + 20 °C)
^a Se deben tener en cuenta las fuerzas dinámicas. Esto se puede hacer mediante la introducción de una presión equivalente p_{dyn} determinada sobre la base de las fuerzas especificadas en los reglamentos internacionales relevantes (véase el anexo A) pero no inferior que 35 kPa (0,35 bar) y se añade éste al manómetro ($p_{vap} - 1 \text{ bar}$). Es necesario tener en cuenta el compartimento mayor. ^b Tomar del reglamento internacional relevante (véase también el capítulo A.4). ^c Es necesario tener en cuenta que los valores mecánicos mínimos garantizados difieren con la temperatura, y tienen que ser elegidos como corresponden. Si no existen valores normalizados disponibles, tienen que determinarse valores aplicables.		

Tabla 32: Criterios de diseño. Fuente: EN 14025

En condiciones de ensayo, la tensión f_d es el mínimo valor de:

Min (0,75 Re; 0,5 Rm)

$$0,75 \cdot R_e = 266,25 \text{ N/mm}^2$$

$$0,5 \cdot R_m = 245 \text{ N/mm}^2$$

$$f_d = 245 \text{ N/mm}^2$$

Por consiguiente, los datos son:

P_p	10 bar	1 Mpa
Di	2300 mm	
f_d	245 N/mm ²	
λ	1	

Tabla 33: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

Y la fórmula que se aplica:

$$e = \frac{p \cdot Di}{2f_d \cdot \lambda_s - p}$$

$$e = \frac{1 \cdot 2300}{2 \cdot 245 \cdot 1 - 1} = 4,70 \text{ mm}$$

Espesor en condiciones de ensayo = 4,70 mm

RAMA D

Para determinar el espesor en condiciones de funcionamiento según la norma EN 14025, se requieren los siguientes datos:

- P_s = presión de servicio (Mpa).
- Di = diámetro interior (mm).
- f_d = tensión en condiciones de funcionamiento (N/mm²).
- λ = coeficiente de soldadura.

La tensión en condiciones de funcionamiento según indica la tabla anterior de criterios de diseño para aceros ferríticos es:

$$\text{Min (Re/1,5; Rm/2,4)}$$

$$\text{Re/1,5} = 236,67 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Rm/2,4} = 204,17 \text{ N/mm}^2$$

$$f_d = 204,17 \text{ N/mm}^2$$

Los datos requeridos:

P_s	4,57 bar	0,46 Mpa
D_i	2300 mm	
f_d	204,17 N/mm ²	
λ	1	

Tabla 34: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

Se aplica la fórmula:

$$e = \frac{p \cdot D_i}{2f_d \cdot \lambda_s - p}$$

$$e = \frac{0,4 \cdot 2300}{2 \cdot 204,17 \cdot 1 - 0,4} = 2,58 \text{ mm}$$

Espesor en condiciones de funcionamiento = 2,58 mm

En la siguiente tabla se agrupan todos los espesores mínimos requeridos, y tal como dice el esquema de la norma EN 14025, se selecciona el mayor:

Mínimo ADR/IMDG (instrucción de transporte T20)	8 mm
Espesor mínimo (Rama A)	4,69 mm
Espesor equivalente (Rama B)	9,90 mm
Espesor ensayo (Rama C)	4,70 mm
Espesor funcionamiento (Rama D)	2,28 mm

Tabla 35: Espesores mínimos requeridos. Fuente propia.

Tal como dice la norma, se selecciona el mayor espesor:

Espesor mínimo de la pared cilíndrica	9,90 mm
---------------------------------------	---------

2.2.2. Espesor de los fondos.

Los fondos son fondos toroidales de tipo Kloepper y según la norma EN 14025 su espesor mínimo es el mayor de los valores e_y , e_s o e_b determinados por las siguientes fórmulas:

$$e_y = \beta_e \cdot \frac{p \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di)}{f_d}$$

$$e_s = \frac{p \cdot R}{2 \cdot f_d \cdot \lambda_s - 0,5 \cdot p}$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di) \cdot \left(\frac{p}{111 \cdot f_d} \cdot \left(\frac{Di}{r} \right)^{0,825} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Para empezar, se determina el valor de β_e a partir de las siguientes fórmulas:

6.3.3.5.2 Fórmulas para el cálculo de β_e

$$Y = \min. (e / R ; 0,04)$$

$$Z = \log_{10} (1 / Y)$$

$$X = r / D_i$$

$$N = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 Y)^4}$$

Para $X = 0,06$:

$$\beta_{e0,06} = N (-0,3635 Z^3 + 2,2124 Z^2 - 3,2937 Z + 1,8873)$$

Para $0,06 < X < 0,1$:

$$\beta_e = 25 [(0,1 - X) \beta_{e0,06} + (X - 0,06) \beta_{e0,1}]$$

Para $X = 0,1$:

$$\beta_{e0,1} = N (-0,1833 Z^3 + 1,0383 Z^2 - 1,2943 Z + 0,837)$$

Para $0,1 < X < 0,2$:

$$\beta_e = 10 [(0,2 - X) \beta_{e0,1} + (X - 0,1) \beta_{e0,2}]$$

Para $X = 0,2$:

$$\beta_{e0,2} = \max. \{ 0,95 (0,56 - 1,94 Y - 82,5 Y^2) ; 0,5 \}$$

Figura 33: Fórmulas para el cálculo de β_e . Fuente: EN 14025.

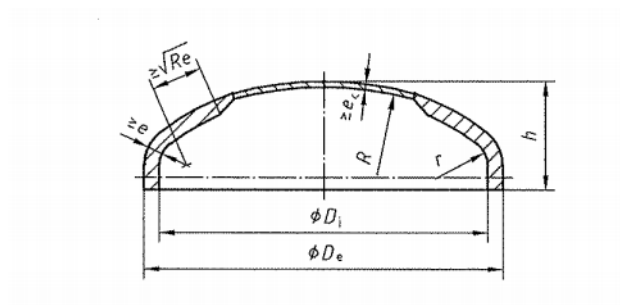


Figura 34: Geometría de los fondos. Fuente: EN 14025.

Con los siguientes datos se aplican las fórmulas:

h	465,68 mm
R	2300 mm
r	230 mm
Di	2300 mm
De	2320 mm
e (espesor min. pared cilíndrica)	9,90 mm

Tabla 36: Datos de los fondos. Fuente propia.

$$Y = \min(e/R ; 0,04)$$

$$Y = \min(10,15/2300; 0,04) = 0,0044$$

$$Z = \log_{10}(1/Y)$$

$$Z = \log_{10}(1/0,0044) = 2,35$$

$$X = r/Di$$

$$X = 230/2300 = 0,1$$

$$N = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot Y)^4}$$

$$N = 1,006 - \frac{1}{6,2 + (90 \cdot 0,0044)^4} = 0,845$$

Una vez calculados los parámetros anteriores, se determina el valor de β_e para $X = 0,1$:

$$\beta_{e_{0,1}} = N \cdot (-0,1833 \cdot Z^3 + 1,0383 \cdot Z^2 - 1,2943 \cdot Z + 0,837)$$

$$\beta_{e_{0,1}} = 0,845 \cdot (-0,1833 \cdot 2,35^3 + 1,0383 \cdot 2,35^2 - 1,2943 \cdot 2,35 + 0,837)$$

$$= \mathbf{0,5946}$$

Para calcular los espesores e_y , e_s o e_b en condiciones de ensayo:

$\beta_{e_{0,1}}$	0,5946
Di	2300 mm
R	2300 mm
r	230 mm
P_p	1 Mpa
λ	1
f_d	245 N/mm²

Tabla 37: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

$$e_y = \beta_e \cdot \frac{p \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di)}{f_d}$$

$$e_y = 0,5946 \cdot \frac{1 \cdot (0,75 \cdot 2300 + 0,2 \cdot 2300)}{245} = 5,30 \text{ mm}$$

$$e_s = \frac{p \cdot R}{2 \cdot f_d \cdot \lambda_s - 0,5 \cdot p}$$

$$e_s = \frac{1 \cdot 2300}{2 \cdot 245 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1} = 4,70 \text{ mm}$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di) \cdot \left(\frac{p}{111 \cdot f_d} \cdot \left(\frac{Di}{r} \right)^{0,825} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$e_b = (0,75 \cdot 2300 + 0,2 \cdot 2300) \cdot \left(\frac{1}{111 \cdot 245} \cdot \left(\frac{2300}{230} \right)^{0,825} \right)^{\frac{2}{3}} = 8,57 \text{ mm}$$

Espesor fondos condiciones de ensayo	
e_y	5,30 mm
e_s	4,70 mm
e_b	8,57 mm

Tabla 38: Espesor de los fondos en condiciones de ensayo. Fuente propia.

El más restrictivo de los tres espesores calculados para condiciones de ensayo es e_b :

Espesor de los fondos en condiciones de ensayo = 8,57 mm

Para calcular los espesores de los fondos en condiciones de funcionamiento se necesitan los siguientes datos:

$\beta_{e0,1}$	0,5946
Di	2300 mm
R	2300 mm
r	230 mm
$P_{servicio}$	0,4 Mpa
λ	1
f_d	204,17 N/mm ²

Tabla 39: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

Se aplican las fórmulas:

$$e_y = \beta_e \cdot \frac{p \cdot (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di)}{f_d}$$

$$e_y = 0,5946 \cdot \frac{0,4 \cdot (0,75 \cdot 2300 + 0,2 \cdot 2300)}{204,17} = 2,57 \text{ mm}$$

$$e_s = \frac{p \cdot R}{2 \cdot f_d \cdot \lambda_s - 0,5 \cdot p}$$

$$e_s = \frac{0,4 \cdot 2300}{2 \cdot 204,17 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,4} = 2,28 \text{ mm}$$

$$e_b = (0,75 \cdot R + 0,2 \cdot Di) \cdot \left(\frac{p}{111 \cdot f_d} \cdot \left(\frac{Di}{r} \right)^{0,825} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$e_b = (0,75 \cdot 2300 + 0,2 \cdot 2300) \cdot \left(\frac{0,4}{111 \cdot 204,17} \cdot \left(\frac{2300}{230} \right)^{0,825} \right)^{\frac{2}{3}} = 5,29 \text{ mm}$$

Espesor fondos condiciones de funcionamiento	
e_y	2,57 mm
e_s	2,28 mm
e_b	5,29 mm

Tabla 40: Espesor de los fondos en condiciones de funcionamiento. Fuente propia.

El más restrictivo de los tres espesores calculados para condiciones de funcionamiento es e_b :

Espesor de los fondos en condiciones de funcionamiento = 5,29 mm

Según la norma, se selecciona el mayor de los valores más altos en condiciones de funcionamiento y ensayo, por lo tanto:

Espesor mínimo de los fondos	8,57 mm
-------------------------------------	----------------

2.3. Aberturas de la envolvente.

Para el diseño de las aberturas situadas en la envolvente se deben de seguir los requisitos del punto 6.5.3.1. de la norma EN 14025.

Las aberturas deben ser o circulares o elípticas. Su tamaño no debe ser superior al valor siguiente:

$$\frac{d_i}{D_i} \leq 0,6$$

El ADR/IMDG en el punto 6.7.2.5.3. menciona que: *todas las cisternas portátiles deberán estar provistas de bocas de hombre o de otras aberturas de inspección suficientemente grandes para permitir una inspección y un acceso adecuados para el mantenimiento y la reparación del interior. Las*

cisternas con compartimentos deberán estar provistas de una boca de hombre o de otras aberturas para la inspección de cada compartimento.

De manera que, en el diseño que se lleva a cabo, solo es necesaria una abertura de inspección que permita el acceso para el mantenimiento y la reparación del interior.

Para el diseño de las aberturas situadas en la envolvente se deben de seguir los requisitos del punto 6.5.3.1. de la norma EN 14025.

Las aberturas deben ser o circulares o elípticas. Su tamaño no debe ser superior al valor siguiente:

$$\frac{d_i}{D_i} \leq 0,6$$

Al solo ser necesaria una abertura, no es necesario realizar el cálculo de distancia entre aberturas.

La siguiente ilustración representa los distintos tipos más comunes de aberturas y la simplificación para su cálculo de espesores.

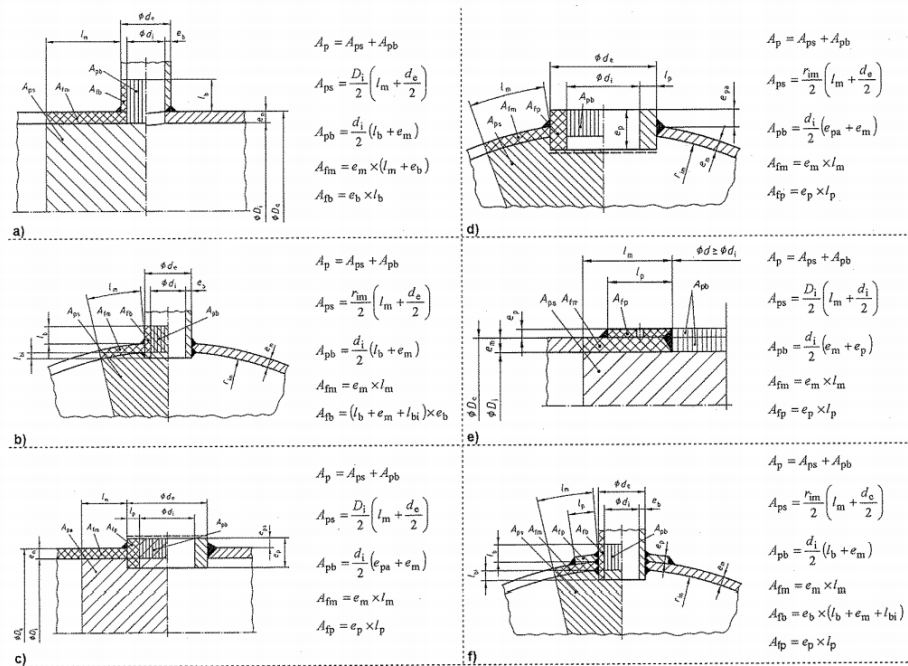


Figura 33: Envolventes con aberturas aisladas. Fuente: EN 14025.

Se aplicarán las fórmulas del caso d) aunque se realizará un diseño ligeramente distinto:

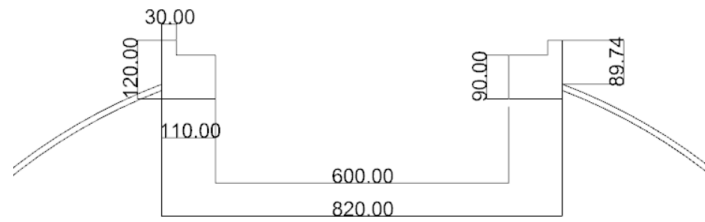


Figura 34: Diseño de la abertura. Fuente propia.

En el único valor donde se utilizará un cálculo distinto es en A_{fp} , que es el área de la sección, que en lugar de ser rectangular tiene otra forma geométrica. La razón de que así sea es poder colocar las válvulas levemente por debajo, ya que el diámetro que se ha dimensionado así lo requiere.

Para que se cumplan las condiciones de dimensionamiento ha de cumplirse lo siguiente:

$$p \cdot [A_p + 0,5 \cdot (A_{fm} + A_{fb} + A_{fp})] \leq (f_d \cdot A_{fm} + f_{db} \cdot A_{fb} + f_{dp} \cdot A_{fp})$$

Las fórmulas para calcular los valores son las siguientes:

$$l_m = \sqrt{(2 \cdot r_i + e_m) \cdot e_m}$$

$$A_{ps} = \frac{r_i}{2} \cdot \left[l_m + \frac{d_e}{2} \right]$$

$$A_{pb} = \frac{d_i}{2} \cdot (e_{pa} + e_m)$$

$$A_p = A_{ps} + A_{pb}$$

$$A_{fm} = e_m \cdot l_m$$

$$A_{fp} = (e_p \cdot l_p) - ((l_p - 80) \cdot (e_p - 30))$$

Se necesitan los siguientes datos, que se extraen del diseño acotado, para aplicar las fórmulas:

Di	2300 mm
ri	1150 mm
di	600 mm
de	820 mm
e_{pa}	89,74 mm

e_p	110 mm
l_p	120 mm
e_m	10,15 mm

Tabla 41: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

$$l_m = \sqrt{(2 \cdot r_i + e_m) \cdot e_m} = l_m = \sqrt{(2 \cdot 1150 + 9,90) \cdot 10,15} = \mathbf{151,24 \text{ mm}}$$

$$A_{ps} = \frac{r_i}{2} \cdot \left[l_m + \frac{d_e}{2} \right] = \frac{1150}{2} \cdot \left[153,16 + \frac{820}{2} \right] = \mathbf{322714,32 \text{ mm}^2}$$

$$A_{pb} = \frac{d_i}{2} \cdot (e_{pa} + e_m) = \frac{600}{2} \cdot (110 + 10,15) = \mathbf{29892,80 \text{ mm}^2}$$

$$A_p = A_{ps} + A_{pb} = 323814,56 + 29968,12 = \mathbf{352607,12 \text{ mm}^2}$$

$$A_{fm} = e_m \cdot l_m = 10,15 \cdot 153,16 = \mathbf{1497,70 \text{ mm}^2}$$

$$A_{fp} = (e_p \cdot l_p) - ((l_p - 80) \cdot (e_p - 30)) = \\ (110 \cdot 120) - ((120 - 80) \cdot (110 - 30)) = \mathbf{10000 \text{ mm}^2}$$

Para cumplir con las condiciones de dimensionamiento de la abertura se agrupan los datos calculados. La condición ha de cumplirse tanto en condiciones de ensayo como en condiciones de funcionamiento:

l_m	151,24 mm	
A_{ps}	322714,32 mm²	
A_{pb}	29892,80 mm²	
A_p	352607,12 mm²	
A_{fm}	1497,70 mm²	
A_{fp}	10000 mm²	
A_{fb}	0	
p	Ensayo	1 Mpa
	Funcionamiento	0,4 Mpa
fd	Ensayo	245 N/mm ²
	Funcionamiento	204,17 N/mm ²

Tabla 42: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

$$p \cdot [A_p + 0,5 \cdot (A_{fm} + A_{fb} + A_{fp})] \leq (f_d \cdot A_{fm} + f_{db} \cdot A_{fb} + f_{dp} \cdot A_{fp})$$

Condiciones de ensayo:

$$1 \cdot [353782,68 + 0,5 \cdot (1555,10 + 0 + 10000)] \leq (245 \cdot 1555,1 + 0 \cdot 0 + 245 \cdot 10000)$$

$$331394,5332 \leq 3647978,127$$

Se cumple.

Condiciones de funcionamiento:

$$0,46 \cdot [353782,68 + 0,5 \cdot (1555,10 + 0 + 10000)] \leq (204,17 \cdot 1555,1 + 0 \cdot 0 + 245 \cdot 10000)$$

$$163768,6814 \leq 2347447,98$$

Se cumple.

Se cumple la norma tanto en condiciones de ensayo como de funcionamiento, por lo que la geometría diseñada de la brida es válida.

2.4. Tapa de la boca de hombre.

En el punto 6.3.6.1. de la norma EN 14025 indica la manera de calcular el espesor mínimo y la geometría de la tapa de la boca de hombre.

El mínimo espesor en el centro de la tapa es:

$$e = [(0,3 \cdot d_G^2 \cdot p / S_F) + \left(1,909 \cdot W_m \cdot \frac{h_G}{d_G \cdot S_F}\right)]^{0,5}$$

Y el mínimo espesor en la zona donde van colocados los tornillos de la tapa es:

$$e1 = \left(1,909 \cdot W_m \cdot \frac{h_G}{d_G \cdot S_F}\right)^{0,5}$$

Donde,

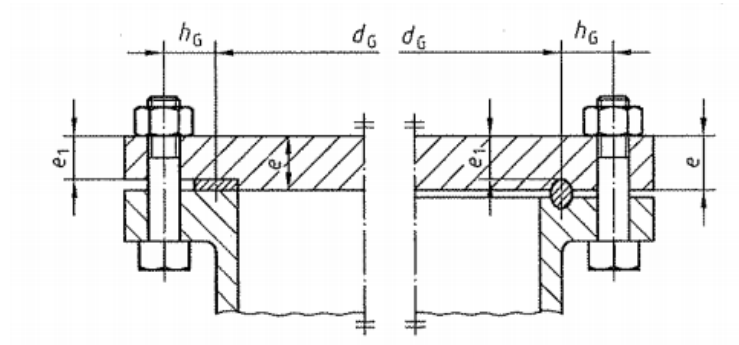


Figura 35: Tapa con junta que solo cubre una parte de la cara de la brida. Fuente: EN 14025.

d_G = diámetro de la superficie de apoyo de la junta.

p_{cal} = presión de cálculo.

S_F = la resistencia de diseño del material de la brida.

h_G = es la distancia desde la junta hasta la circunferencia media de los centros de los tornillos.

$$W_m = 0,5 \cdot (A_b + A_m) \cdot S_a$$

A_b = es la sección transversal total de los tornillos.

$$A_b = \pi \cdot \left(\frac{\text{metrica}}{2} \right)^2 \cdot n$$

A_m = es el mayor de:

$$\begin{aligned} - A_{m_1} &= \frac{W_{m_1}}{S_b} \\ - A_{m_2} &= \frac{W_{m_2}}{S_a} \end{aligned}$$

$S_a = S_b$ = esfuerzo de diseño de los tornillos.

$$S_a = S_b = \min (Re/1,5 ; R_m/2,4)$$

W_{m_1} = carga mínima de los tornillos en condiciones de funcionamiento:

$$W_{m_1} = 0,785 \cdot d_G^2 \cdot p + 6,28 \cdot b \cdot d_G \cdot m \cdot p$$

W_{m_2} = carga mínima de los tornillos en condiciones de apriete:

$$W_{m_2} = 3,14 \cdot b \cdot d_G \cdot y$$

m = es un factor de junta que se tomará de una tabla.

y = es el esfuerzo de asiento mínimo de diseño para juntas, que se toma de una tabla.

n = número de tornillos.

b = es la anchura efectiva de la junta:

$$\begin{aligned} b &= b_0 && \text{cuando} && b_0 \leq 6,3 \text{ mm} \\ b &= 2,52 \cdot b_0^{0,5} && \text{cuando} && b_0 \geq 6,3 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$b_0 = N/2$$

N = anchura máxima de la junta.

Con todos los parámetros definidos, se determinan sus valores para poder calcular los espesores “e” y “e1”:

d_G	644 mm
$d_{\text{Tornillos}}$	700 mm
Métrica	22 mm
h_G	28 mm
N	13 mm
p_{cal}	0,67 Mpa
S_f	204,17 N/mm ²
R_m tornillos	900 N/mm ²
R_e tornillos	810 N/mm ²
$S_a = S_b$	375 N/mm ²
n	20 tornillos
A_b	7602,7 mm ²

Tabla 43: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

Se comienzan los cálculos:

$$b_0 = N/2$$

$$b_0 = 13/2 = 6,5 \text{ mm}$$

$$b = 2,52 \cdot b_0^{0,5} \quad \text{cuando} \quad b_0 \geq 6,3 \text{ mm}$$

$$b = 2,52 \cdot 6,5^{0,5} = 6,4 \text{ mm}$$

La junta será de teflón, por lo que los valores de “y” y “m”:

PTFE	Envoltura PTFE	2,0	13,8
	PTFE macizo de 1,5 mm de espesor	2,75	25,4
	PTFE macizo de 3 mm de espesor	2,0	11,0
	PTFE trenzado	2,0	11,0

Tabla 44: Factor de junta “m” y esfuerzo de asiento de diseño “y”. Fuente: EN 14025.

$$m = 2$$

$$y = 11 \text{ N/mm}$$

Se calcula W_{m1} y W_{m2} :

$$W_{m1} = 0,785 \cdot d_G^2 \cdot p + 6,28 \cdot b \cdot d_G \cdot m \cdot p$$

$$W_{m1} = 0,785 \cdot 644^2 \cdot 0,67 + 6,28 \cdot 6,4 \cdot 644 \cdot 2 \cdot 0,67 = \mathbf{251690,2 \text{ N}}$$

$$W_{m2} = 3,14 \cdot b \cdot d_G \cdot y$$

$$W_{m2} = 3,14 \cdot 6,4 \cdot 644 \cdot 11 = \mathbf{142910,9 \text{ N}}$$

Se calculan A_{m1} y A_{m2} :

$$A_{m1} = \frac{W_{m1}}{S_b}$$

$$A_{m1} = \frac{251690,2}{375} = 671,2 \text{ mm}^2$$

$$A_{m2} = \frac{W_{m2}}{S_a}$$

$$A_{m2} = \frac{142910,9}{375} = 381,1 \text{ mm}^2$$

A_m es la mayor entre A_{m1} y A_{m2} :

$$\mathbf{A_m = 671,2 \text{ mm}^2}$$

Se calcula W_m :

$$W_m = 0,5 \cdot (A_b + A_m) \cdot S_a$$

$$W_m = 0,5 \cdot (7602,7 + 671,2) \cdot 375 = \mathbf{1551342,8 \text{ N}}$$

Y por último se calculan los espesores mínimos de la tapa:

$$e = [(0,3 \cdot d_G^2 \cdot p / S_F) + (1,909 \cdot W_m \cdot \frac{h_G}{d_G \cdot S_F})]^{0,5}$$

$$e = [(0,3 \cdot 644^2 \cdot 0,67 / 204,17) + (1,909 \cdot 1551342,8 \cdot \frac{28}{644 \cdot 204,17})]^{0,5} = 32,2 \text{ mm}$$

$$e1 = \left(1,909 \cdot W_m \cdot \frac{h_G}{d_G \cdot S_F} \right)^{0,5}$$

$$e1 = \left(1,909 \cdot 1551342,8 \cdot \frac{28}{644 \cdot 204,17} \right)^{0,5} = 25,1 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

Espesor mínimo centro de la tapa	32,2 mm
Espesor mínimo de la tapa zona de los tornillos	25,1 mm

Tabla 45: Espesores de la tapa. Fuente propia.

2.5. Cálculo de la presión externa.

La norma EN 14025 deriva a la EN 13445-3 para calcular la presión externa: *La presión externa debe calcularse según el capítulo 8 de la norma EN 13445-3. Recipientes a presión no sometidos a la acción de la llama. Parte 3: Diseño.*

El coeficiente de seguridad mínimo que se aplica en este capítulo de la norma es:

$S = 1,5$ para situaciones de cálculo

$S = 1,1$ para situaciones de ensayo

El cálculo de la presión externa se hace en dos partes, primero en el cilindro y posteriormente en los fondos.

Cilindro

Se comienza calculando la longitud no sostenida "L" de la cisterna:

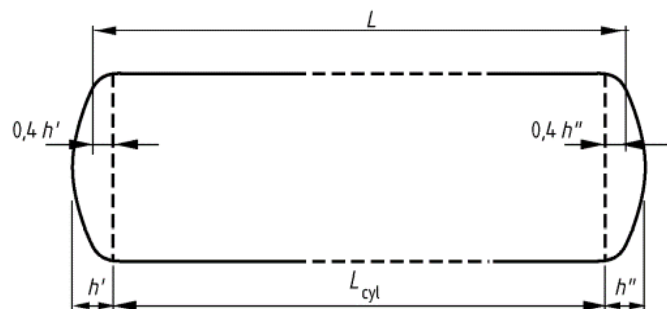


Figura 36: Cilindro con fondos. Fuente: EN 13445.

A partir de la fórmula:

$$L = L_{cyl} + 0,4h' + 0,4h''$$

Y los datos:

L_{cyl}	5042,64 mm
h'	465,68 mm
h''	465,68 mm

Tabla 46: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

$$L = 5042,64 + 0,4 \cdot 465,68 + 0,4 \cdot 465,68 = \mathbf{5415,18 \text{ mm}}$$

El punto 8.5.2.2. expone: *el espesor de un cilindro no debe ser inferior según el determinado según el procedimiento siguiente.*

El sentido del procedimiento es comprobar que, con el espesor mínimo previamente calculado, se cumple la siguiente condición (ADR/IMDG):

$$P > 0,4 \text{ bar}$$

Donde P = presión exterior de cálculo requerida.

Por ello, se exponen las fórmulas requeridas para el cálculo de P:

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_a}{R}$$

$$P_m = \frac{E \cdot e_a \cdot \varepsilon}{R}$$

P_y = es la presión a la cual la tensión circunferencial media en una envolvente cilíndrica o cónica alcanza el límite de fluencia.

P_m = es la presión de inestabilidad elástica teórica que provoca el hundimiento de una envolvente perfectamente cilíndrica, cónica o esférica.

e_a = espesor mínimo calculado según EN 14025.

ε = es la deformación circunferencial elástica media durante el hundimiento.

E = es el valor del módulo de elasticidad a la temperatura de cálculo.

R = radio interno de la envolvente cilíndrica.

σ_e = límite de elasticidad nominal que, para aceros no austeníticos, viene dado por:

$$\sigma_e = R_{p0,2/t} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$R_{p0,2/t}$ = es el valor mínimo del límite de elasticidad del material.

Se van determinando los valores anteriores:

Para hallar E, se hace uso de la siguiente figura según una temperatura de cálculo de 15°:

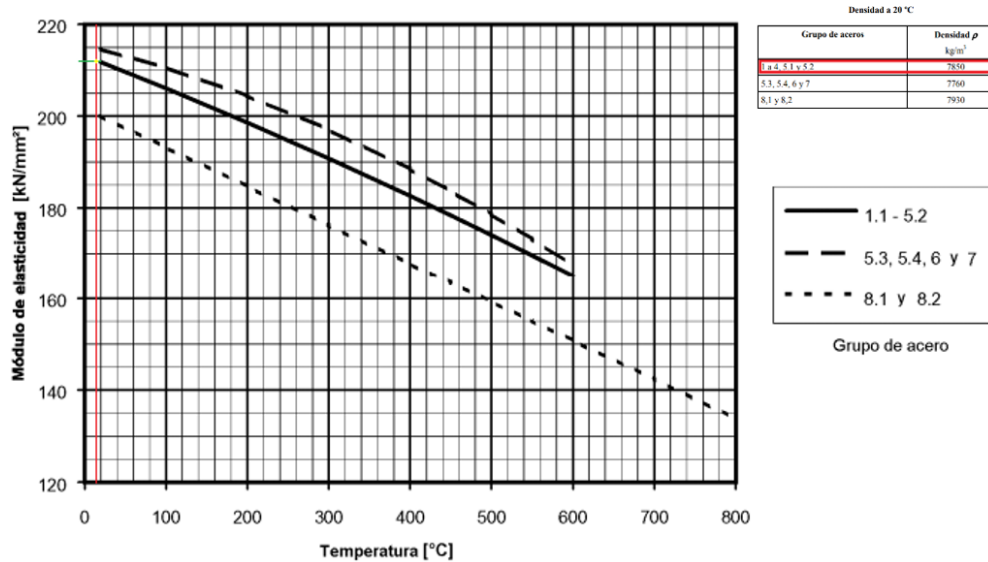


Figura 37: Módulo de elasticidad del acero. Fuente: EN 13445.

$$E = 212000 \text{ N/mm}^2$$

ε se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{ea^2}{12 \cdot R^2 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right\}$$

Donde,

n_{cyl} = es el número de ondas circunferenciales para una parte no reforzada del cilindro. Se determina a partir de una gráfica.

$$Z = \frac{\pi \cdot R}{L}$$

Datos para comenzar los cálculos:

L	5415,18 mm
L_{cyl}	5042,64 mm
R	1150 mm
e_a	9,90 mm
v	0,3
h'	465,68 mm
h''	465,68 mm
S_c	1,5
S_e	1,1
E	212000 N/mm ²

Tabla 47: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

Se determina n_{cyl} a partir de la gráfica y los siguientes parámetros:

$$e_a/2R = 0,0043$$

$$L/2R = 2,35$$

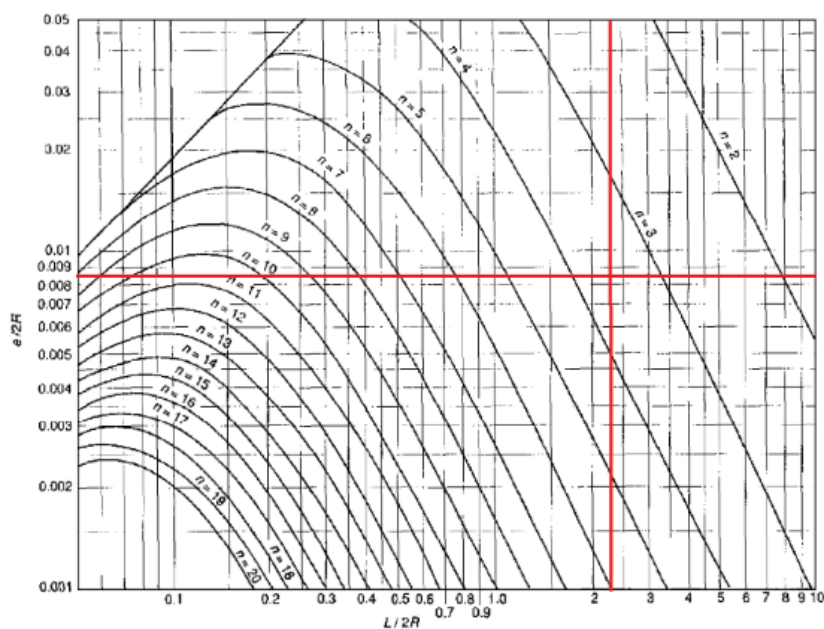


Figura 37: Gráfica para hallar n_{cyl} . Fuente: EN 13445.

$$n_{cyl} = 3,5$$

Se determina Z:

$$Z = \frac{\pi \cdot R}{L}$$

$$Z = \frac{\pi \cdot 1150}{5415,18} = 0,67$$

Se agrupan los valores necesarios para calcular ε :

R	1150 mm
e_a	9,90 mm
v	0,3
n_{cyl}	3,5
Z	0,67

Tabla 48: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

$$\varepsilon = \frac{1}{n_{cyl}^2 - 1 + \frac{Z^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{n_{cyl}^2}{Z^2} + 1 \right)^2} + \frac{ea^2}{12 \cdot R^2 \cdot (1 - v^2)} \cdot (n_{cyl}^2 - 1 + Z^2)^2 \right\}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{3,5^2 - 1 + \frac{0,67^2}{2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\left(\frac{3,5^2}{0,67^2} + 1 \right)^2} + \frac{9,9^2}{12 \cdot 1150^2 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot (3,5^2 - 1 + 0,67^2)^2 \right\} = \mathbf{0,000188107}$$

Los valores para realizar el cálculo de las presiones P_y y P_m :

e_a	9,90 mm
E	212000 N/mm²
ε	0,000188107
σ_e	355 N/mm²
R	1150 mm

Tabla 49: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

$$P_y = \frac{\sigma_e \cdot e_a}{R}$$

$$P_y = \frac{355 \cdot 9,90}{1150} = \mathbf{3,06 \text{ N/mm}^2}$$

$$P_m = \frac{E \cdot e_a \cdot \varepsilon}{R}$$

$$P_m = \frac{212000 \cdot 9,90 \cdot 0,000188107}{1150} = 0,343,06 \text{ N/mm}^2$$

A continuación, se estima la relación P_r/P_y a partir de la siguiente gráfica:

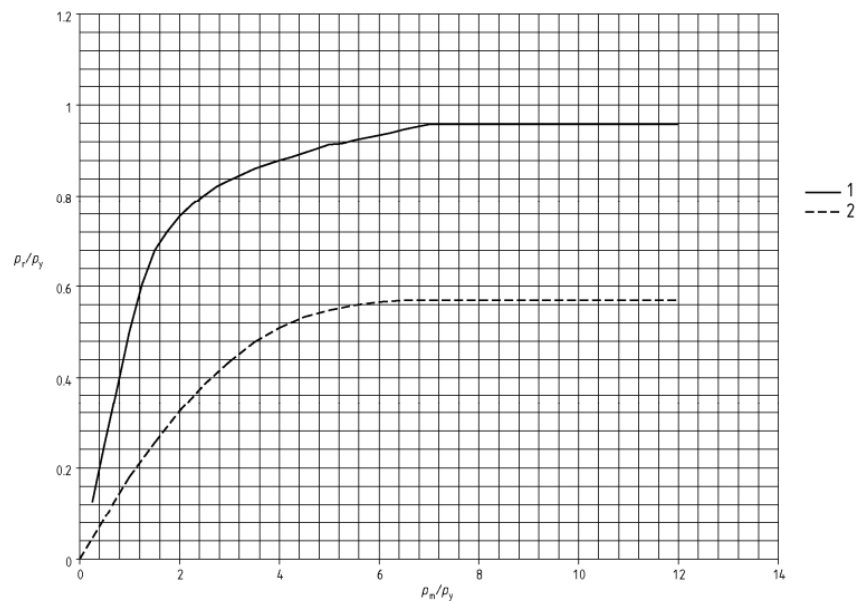


Figura 38: Valores de P_r/P_y en función de P_m/P_y . Fuente: EN 13445

$P_m/P_y = 0,11$, al ser un valor tan pequeño no se puede comprobar bien en la gráfica, por lo que se intuye de la siguiente tabla:

1 Cilindros y conos

P_m/P_y	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
P_r/P_y	0	0,125	0,251	0,375	0,5	0,605	0,68	0,72	0,755	0,78	0,803	0,822	0,836	0,849	0,861
P_m/P_y		3,75	4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,25	5,5	5,75	6,0	6,25	6,5	6,75	$\geq 7,0$
P_r/P_y		0,87	0,879	0,887	0,896	0,905	0,914	0,917	0,923	0,929	0,935	0,941	0,947	0,953	0,959

2 Esferas y fondos cóncavos

P_m/P_y	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4	4,5	5,0	5,5	6	$\geq 6,5$
P_r/P_y	0	0,09	0,18	0,255	0,324	0,386	0,435	0,479	0,51	0,533	0,548	0,565	0,56	0,57

Tabla 50: Datos para hallar P_r/P_y . Fuente: EN 13445.

Se puede observar tanto en la gráfica y en la tabla que el primer tramo es lineal, por lo que se estima que para $P_m/P_y = 0,11$:

$$P_r/P_y = 0,055$$

Se halla P_r :

$$Pr = (Pr/Py) \cdot Py$$

$$Pr = 0,055 \cdot 3,06 = 0,17 \text{ N/mm}^2$$

Para calcular P:

$$P = Pr/S$$

Para condiciones de cálculo:

$$P = 0,17/1,5 = 0,11 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{1,1 \text{ bar} > 0,4 \text{ bar}}$$

Para condiciones de ensayo:

$$P = 0,17/1,1 = 0,15 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{1,5 \text{ bar} > 0,4 \text{ bar}}$$

El cálculo de la presión externa para el cilindro según el espesor calculado cumple las condiciones de diseño.

Fondos

El cálculo para presión externa de los fondos se realiza a partir de las siguientes fórmulas:

$$P_y = \frac{2 \cdot \sigma_e \cdot e_a}{R}$$

$$P_m = \frac{1,21 \cdot E \cdot e_a^2}{R^2}$$

Donde,

P_y = es la presión a la cual la tensión circunferencial media en una envolvente cilíndrica o cónica alcanza el límite de fluencia.

P_m = es la presión de inestabilidad elástica teórica que provoca el hundimiento de una envolvente perfectamente cilíndrica, cónica o esférica.

e_a = espesor mínimo del fondo calculado según EN 14025.

E = es el valor del módulo de elasticidad a la temperatura de cálculo.

R = radio interno de bombeo del fondo.

σ_e = límite de elasticidad nominal que, para aceros no austeníticos, viene dado por:

$$\sigma_e = R_{p0,2/t} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$R_{p0,2/t}$ = es el valor mínimo del límite de elasticidad del material.

Sus valores son:

e_a	8,57 mm
E	212000 N/mm ²
R	2300 mm
σ_e	355 N/mm ²

Tabla 51: Datos para realizar el cálculo. Fuente propia.

Se resuelven las ecuaciones:

$$P_y = \frac{2 \cdot \sigma_e \cdot e_a}{R}$$

$$P_y = \frac{2 \cdot 355 \cdot 8,57}{2300} = 2,65 \text{ N/mm}^2$$

$$P_m = \frac{1,21 \cdot E \cdot e_a^2}{R^2}$$

$$P_m = \frac{1,21 \cdot 212000 \cdot 8,57^2}{2300^2} = 3,56 \text{ N/mm}^2$$

A continuación, se estima la relación P_r/P_y a partir de la siguiente gráfica:

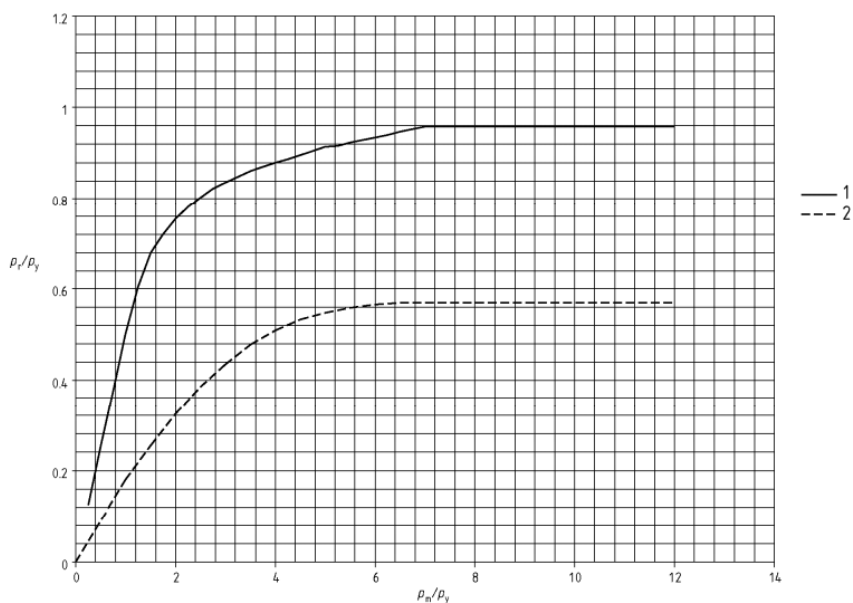


Figura 39: Valores de P_r/P_y en función de P_m/P_y . Fuente: EN 13445

1 Cilindros y conos

P_m/P_y	0	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
P_t/P_y	0	0,125	0,251	0,375	0,5	0,605	0,68	0,72	0,755	0,78	0,803	0,822	0,836	0,849	0,861
P_m/P_y		3,75	4,0	4,25	4,5	4,75	5,0	5,25	5,5	5,75	6,0	6,25	6,5	6,75	$\geq 7,0$
P_t/P_y		0,87	0,879	0,887	0,896	0,905	0,914	0,917	0,923	0,929	0,935	0,941	0,947	0,953	0,959

2 Esferas y fondos cóncavos

P_m/P_y	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5	4	4,5	5,0	5,5	6	$\geq 6,5$
P_t/P_y	0	0,09	0,18	0,255	0,324	0,386	0,435	0,479	0,51	0,533	0,548	0,565	0,56	0,57

Tabla 52: Datos para hallar Pr/Py . Fuente: EN 13445.

Se estima que para $P_m/Py = 1,35$:

$$Pr/Py = 0,23$$

Se halla Pr :

$$Pr = (Pr/Py) \cdot Py$$

$$Pr = 0,23 \cdot 2,65 = 0,61 \text{ N/mm}^2$$

Para calcular P :

$$P = Pr/S$$

Para condiciones de cálculo:

$$P = 0,61/1,5 = 0,41 \text{ N/mm}^2 = 4,1 \text{ bar} > 0,4 \text{ bar}$$

Para condiciones de ensayo:

$$P = 0,61/1,1 = 0,55 \text{ N/mm}^2 = 5,5 \text{ bar} > 0,4 \text{ bar}$$

El cálculo de la presión externa para los fondos según el espesor calculado cumple las condiciones de diseño.

2.6. Caudal mínimo de la válvula de seguridad.

De acuerdo con el código IMDG en el punto 6.7.2.12.1., la sección de paso debe ser de una sección de paso equivalente a un orificio de 31.75 mm de diámetro lo que es lo mismo a un paso de 1 1/4", lo que da una sección de paso de 791.7 mm². El dispositivo de depresión debe tener una sección de paso de 284 mm².

La válvula de seguridad que se va a utilizar es de tamaño 2 1/2" por lo tanto de secciones de paso muy superiores a las solicitadas. Para determinar la capacidad total requerida por el dispositivo reductor de presión se ha de utilizar o bien la fórmula de 6.7.2.12.2.1 o bien el cuadro de 6.7.2.12.2.3.

A Superficie expuesta (metros cuadrados)	Q (metros cúbicos de aire por segundo)	A Superficie expuesta (metros cuadrados)	Q (metros cúbicos de aire por segundo)
2	0,230	37,5	2,539
3	0,320	40	2,677
4	0,405	42,5	2,814
5	0,487	45	2,949
6	0,565	47,5	3,082
7	0,641	50	3,215
8	0,715	52,5	3,346
9	0,788	55	3,476
10	0,859	57,5	3,605
12	0,998	60	3,733
14	1,132	62,5	3,860
16	1,263	65	3,987
18	1,391	67,5	4,112
20	1,517	70	4,236
22,5	1,670	75	4,483
25	1,821	80	4,726
27,5	1,969	85	4,967
30	2,115	90	5,206
32,5	2,258	95	5,442
35	2,400	100	5,676

Tabla 53: Tasa mínima de descarga. Fuente: IMDG.

Siendo A la superficie externa total del depósito en metros cuadrados, según el diseño en Rinhoceros, el área del depósito en este caso es de 47,5 m².

Por lo tanto, el caudal mínimo requerido es:

$$Q = 3,082 \text{ m}^3/\text{s} = 11095,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

La válvula de seguridad instalada debe tener un caudal, en metros cúbicos hora, de 11095,2 m³/h como mínimo.

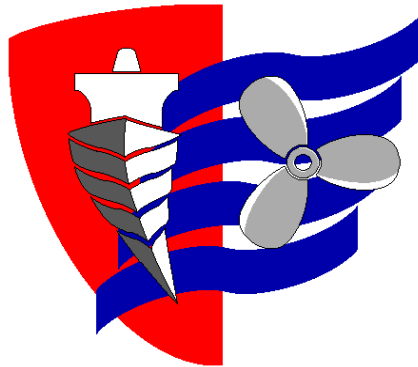
El ADR exige que la válvula de seguridad esté tarada un 110 % de los 2/3 de la presión de ensayo.

La presión de ensayo es 10 bar. El tarado de la válvula de seguridad debe ser:

$$10 \cdot \frac{2}{3} \cdot 1,1 = 7,34 \text{ bar}$$

El caudal de la válvula elegida (Fort Vale de 2 ½ pulgadas), según los datos del fabricante, es 7011 m³/s a 7,3 bar. Por consiguiente, la válvula seleccionada es adecuada para su uso como válvula de seguridad.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



VALIDACIÓN DEL DISEÑO

Documento 3

Trabajo de fin de grado
Ingeniería Marítima

3. Validación del diseño. 84

3.1. Requisitos de las normas..... 85

3.2. Aplicación del material..... 86

3.3. Mallado del diseño..... 87

3.4. Comentarios sobre la simulación. 88

3.5. Ensayos..... 88

3. Validación del diseño.

Se realiza la validación del contenedor diseñado por método de elementos finitos a partir de los ensayos requeridos por las normas. El software utilizado dentro del programa SolidWorks es Dassault Systems.

El orden en el que se han realizado los ensayos es el siguiente:

- Mallado de la estructura.
- Aplicación del material correspondiente.
- Aplicación de cargas.
- Aplicación de sujeciones.
- Ejecución del estudio.

Los ensayos que se llevan a cabo son los siguientes:

1. Apilamiento (ISO 1496-3/6.2.)
2. Izado por cantoneras superiores (ISO 1496-3/6.3).
3. Izado por cantoneras inferiores (ISO 1496-3/6.4).
4. Solicitación estática exterior (1496-3/6.5).
5. Solicitación estática interna longitudinal (1496-3/6.6).
6. Solicitación estática interna transversal (1496-3/6.7).
7. Rigidez transversal. (1496-3/6.8).
8. Rigidez longitudinal. (1496-3/6.9).
9. 2g en el sentido de la marcha (ADR/ 6.8.2.1.2)
10. g en el sentido transversal (ADR/ 6.8.2.1.2).
11. g en el sentido vertical ascendente (ADR/ 6.8.2.1.2).
12. 2g en el sentido vertical descendente (ADR/ 6.8.2.1.2).

3.1. Requisitos de las normas.

ISO 1496-3: Specification and testing. Part 3: tank containers for liquids, gases and pressurized dry bulk.

Para que la validación del diseño sea correcta, la norma exige cumplir los siguientes requisitos:

- No debe haber tensiones que provoquen deformaciones permanentes o roturas. En ningún punto del contenedor debe sobrepasarse el límite elástico del contenedor.
- Los desplazamientos elásticos no deben sobrepasar los máximos impuestos por la norma ISO 668:

Freight container designation	S (ref.)		P (ref.)		K ₁ max. ^a		K ₂ max. ^b	
	mm	ft and in	mm	ft and in	mm	in	mm	in
1EEE 1EE	13 509	44' 3 7/8"	2 259	7' 4 31/32"	19	3/4	10	3/8
1AAA 1AA 1A 1AX	11 985	39' 3 7/8"	2 259	7' 4 31/32"	19	3/4	10	3/8
1BBB 1BB 1B 1BX	8 918	29' 3 1/8"	2 259	7' 4 31/32"	16	5/8	10	3/8
1CC 1C 1CX	5 853	19' 2 7/16"	2 259	7' 4 31/32"	13	1/2	10	3/8
1D 1DX	2 787	9' 1 23/32"	2 259	7' 4 31/32"	10	3/8	10	3/8

NOTE Attention of manufacturers is drawn to the vital importance of accurately maintaining the reference dimensions of S and P (see Figure A.1). The tolerances to be applied to S and P are governed by the tolerances shown for the overall length and width in this International Standard and in ISO 1161.

^a K₁ is the difference between D₁ and D₂ or between D₃ and D₄; therefore K₁ = | D₁ - D₂ | or K₁ = | D₃ - D₄ |.

^b K₂ is the difference between D₅ and D₆; therefore K₂ = | D₅ - D₆ |.

Tabla 54: Distancia máxima admisible entre diagonales. Fuente: ISO 668.

ADR/ 6.8.2.1.

Los contenedores cisterna deberán ser capaces de absorber, cargados con el peso máximo admisible en dirección transversal perpendicular al sentido de la marcha, una vez el peso total.

Los depósitos, sus sujeciones y equipos de servicio y de estructura se diseñarán para resistir:

- las solicitaciones estáticas y dinámicas, en condiciones normales de transporte, tal como se definen en los apartados 6.8.2.1.2 y 6.8.2.1.13.
- las tensiones mínimas impuestas, tal como se definen en el apartado 6.8.2.1.15.

6.8.2.1.15. A la presión de prueba, la tensión σ en el punto del depósito sometido a mayor esfuerzo ha de ser menor o igual que los límites fijados a continuación, en función de los materiales.

$$\sigma \leq 0,75 \text{ Re } \text{ ó } \sigma \leq 0,5 \text{ Rm}$$

$$\sigma = 245 \text{ N/mm}^2$$

Se definen los siguientes valores obtenidos del proyecto para su posterior aplicación.

Tara:

$$T = 6100 \text{ kg}$$

Rating:

$$R = 30480 \text{ kg}$$

Carga útil:

$$P = 24580 \text{ kg} \quad P = R - T$$

Peso total con la máxima capacidad cargado de agua:

$$W = 29625 \text{ kg}$$

3.2. Aplicación del material.

Antes de comenzar con los ensayos, se aplican los materiales correspondientes a cada pieza:

Para la cisterna P355NL1:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.100000031e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante	7.9e+10	N/m ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción	490000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	355000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1.1e-05	/K
Conductividad térmica	14	W/(m·K)

Tabla 55: Propiedades P355NL1. Fuente propia.

Para la estructura S275J:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.100000031e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.28	N/D
Módulo cortante	7.9e+10	N/m ²
Densidad de masa	7800	kg/m ³
Límite de tracción	430000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	275000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1.1e-05	/K
Conductividad térmica	14	W/(m·K)

Tabla 56: propiedades S275J. Fuente propia.

3.3. Mallado del diseño.

Las características del mallado de la estructura son las siguientes:



Figura 40: Mallado de la estructura. Fuente propia.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Tamaño de elementos	40 mm
Tolerancia	2 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Tabla 57: Características del mallado. Fuente propia.

3.4. Comentarios sobre la simulación.

- Se toma como referencia el valor del límite elástico del material para la escala gráfica, es decir, el color rojo corresponde al valor del límite elástico. Por lo que, si en la simulación se observa color rojo en alguna zona, es que se ha superado el límite elástico.
- Para las deformaciones se utiliza como referencia el valor de 5 mm, que es una deformada razonable. Si se supera ese valor en la simulación, se verá en color rojo.
- Los picos de tensión que se encuentran en los ensayos son debido a que la modelización de la estructura no es completamente real, ya que hay muchas esquinas vivas que concentran tensiones que en la realidad no existen porque las transiciones son suaves.

3.5. Ensayos.

1. Apilamiento (ISO 1496-3/6.2.)

El ensayo de apilamiento consiste en la capacidad del contenedor para soportar las cargas de un apilamiento de nueve alturas. El contenedor estará lleno de agua en su capacidad total durante el ensayo.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

Figure No.	End elevations	Side elevations
A.1	<p>Stacking Test No. 1</p> <p>Not applicable to 1D and 1DX tank containers</p>	

Tabla 58: Solicitaciones ensayo 1. Fuente ISO 1496-3.

La suma de las cargas de 8 contenedores sobre el contenedor es 3392 kN, por lo tanto, por poste será 848 kN.

848 kN/cantonera

La tara del contenedor y el peso del agua distribuidas:

Tara = $6,1 \cdot 9,81 = 59,841$ kN

Carga de agua = $23525 \text{ kg} \cdot 9,81 = 230,78$ kN

$W = \text{Tara} + \text{Carga de agua} = 290,621$ kN carga distribuida

Sujeciones:

Fijas en las cuatro cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

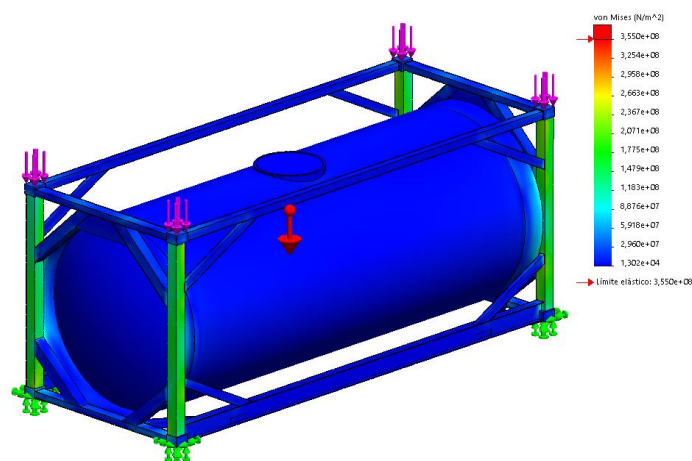


Figura 41: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises no es mayor que la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

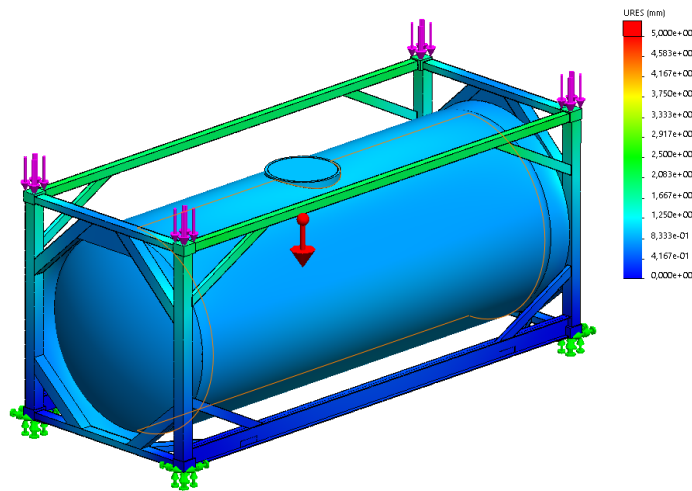


Figura 42: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es muy inferior a las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

2. Izado por cantoneras superiores (ISO 1496-3/6.3).

El ensayo 6.3 consiste en dos pruebas:

Prueba 1

La primera se basa en probar la habilidad del contenedor de aguantar las fuerzas que surgen de la aceleración de la carga en las operaciones de izado.

El ensayo consiste en la elevación por las cuatro cantoneras del contenedor.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

Figure No.	End elevations	Side elevations
A.2	<p>Top lift</p>	

Tabla 59: Solicitaciones prueba 1 (ensayo 2). Fuente ISO 1496-3.

Se aplican cargas verticalmente ascendentes en las cuatro cantoneras superiores:

$$\frac{R \cdot g}{2} = \frac{30480 \cdot 9,81}{2} = 149504 \text{ N} = 149,5 \text{ kN/cantonera}$$

En las cantoneras inferiores se aplican cargas verticalmente descendentes:

$$\frac{R \cdot g}{2} - \frac{T \cdot g}{4} = \frac{30480 \cdot 9,81}{2} - \frac{6100 \cdot 9,81}{4} = 134,5 \text{ kN/cantonera}$$

Al ser un estudio estático, para la simulación de las fuerzas a la que está sometida la estructura, se aplica la suma de las fuerzas en sentido vertical ascendente fijando la estructura de las cantoneras inferiores.

284 kN

Sujeciones:

Fijaciones rígidas en las cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

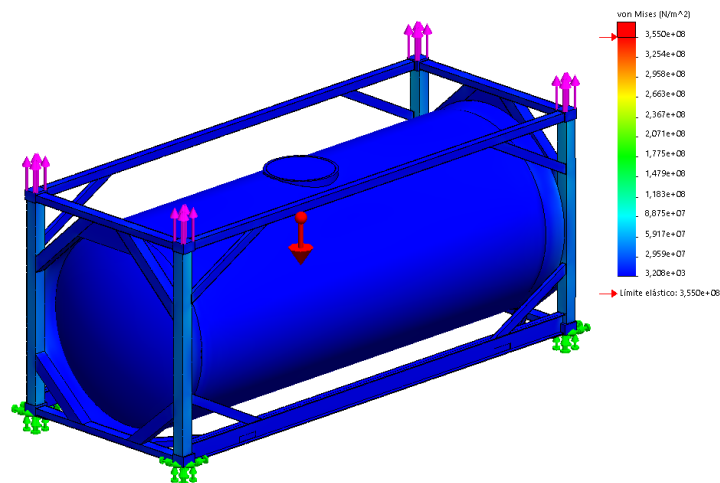


Figura 43: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

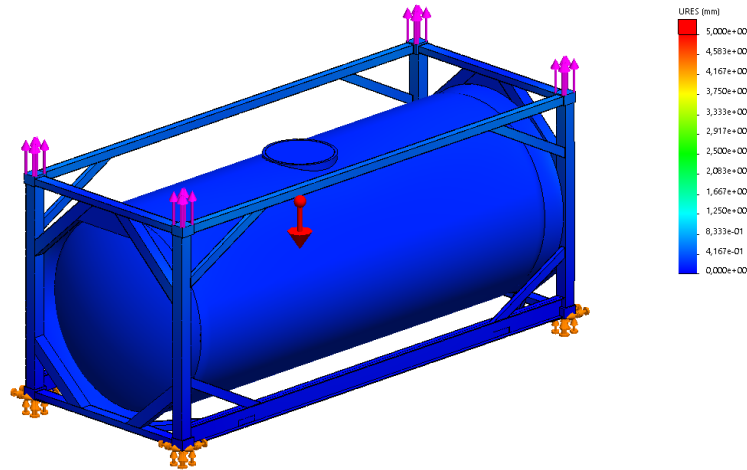


Figura 44: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

Prueba 2

La segunda consiste en la evaluación de la capacidad del contenedor para ser elevado por las cuatro cantoneras superiores con las fuerzas de izado aplicadas verticalmente.

El ensayo consiste en la suspensión en el aire del contenedor por las cuatro cantoneras superiores.

La combinación del llenado de carga del contenedor y la tara del contenedor debe ser igual a 2R.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

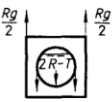
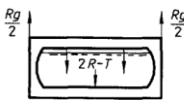
A.3	Top lift Test No. 2 	
Not applicable to 1D and 1DX containers		

Tabla 60: Solicitaciones prueba 2 (ensayo 2). Fuente ISO 1496-3.

Las reacciones son:

$$\frac{R \cdot g}{2} = \frac{30480 \cdot 9,81}{2} = 149504 \text{ N} = 149,5 \frac{\text{kN}}{\text{cantonera}}$$

Se aplica una fuerza distribuida descendente de valor:

$$2 \cdot R \cdot g = 2 \cdot 30480 \cdot 9,81 = 598017 \text{ N} = 598 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Sujeción fija en las cantoneras superiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

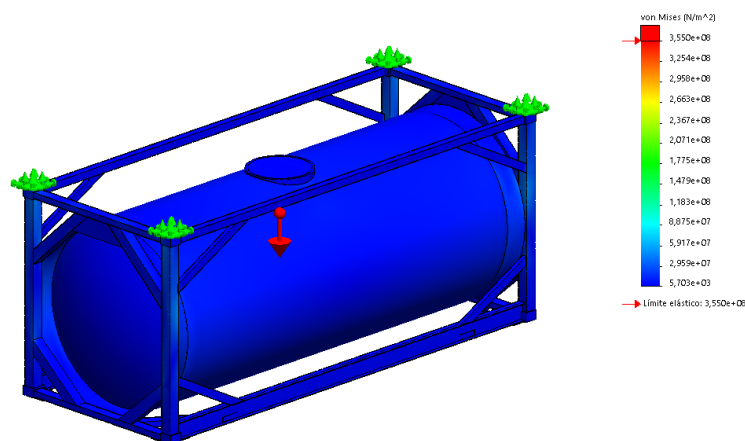


Figura 45: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

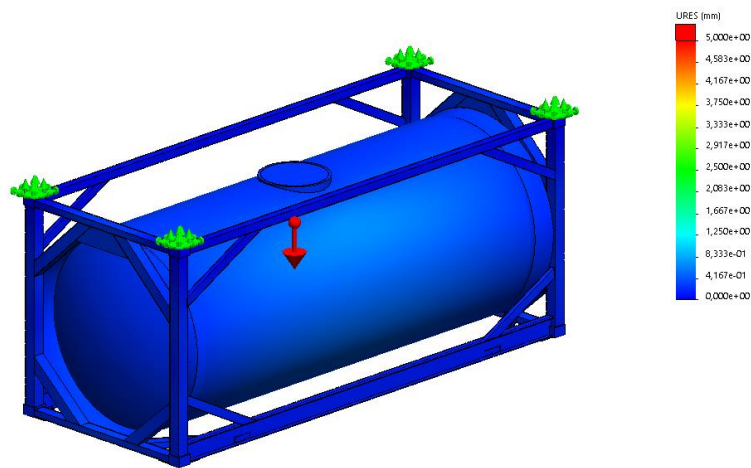


Figura 46: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultados del análisis: aceptado.

3. Izado por cantoneras inferiores (ISO 1496-3/6.4).

El ensayo se basa en probar la capacidad del contenedor de aguantar su izado por medio de dispositivos de elevación que se apoyan en las cantoneras inferiores.

Para un contenedor del tipo 1CC, $\theta = 45^\circ$.

La combinación del llenado de carga del contenedor y la tara del contenedor debe ser igual a 2R.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

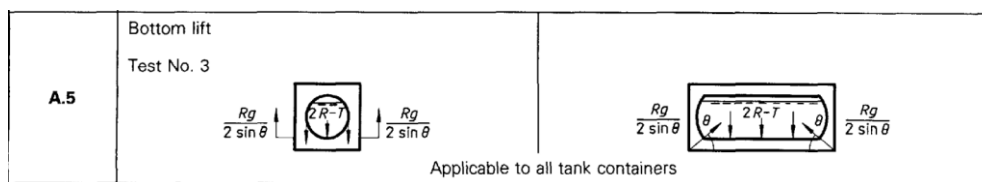


Tabla 61: Solicitaciones ensayo 3. Fuente propia.

Habría que aplicar cargas ascendentes con un ángulo de 45° en las cuatro cantoneras inferiores del siguiente valor:

$$\frac{R \cdot g}{2 \cdot \sin \theta} = \frac{30480 \cdot 9,81}{2 \cdot \sin 45} = 211431 \text{ N} = 211,4 \text{ kN/cantonera}$$

Se descompone la fuerza en sus componentes vertical y horizontal para poder aplicarlo en la simulación cada cara de la cantonera, por lo que:

Dirección y: $211,4 \cdot \sin 45 = 149,5 \text{ kN}$

Dirección z: $211,4 \cdot \sin 45 = 149,5 \text{ kN}$

Se aplica una fuerza distribuida descendente de valor:

$$2 \cdot R \cdot g = 2 \cdot 30480 \cdot 9,81 = 598017 \text{ N} = 598 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Se fija en la brida de la boca de hombre para limitar los desplazamientos del modelo. Es la opción en la que la simulación más se asemeja a la realidad.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

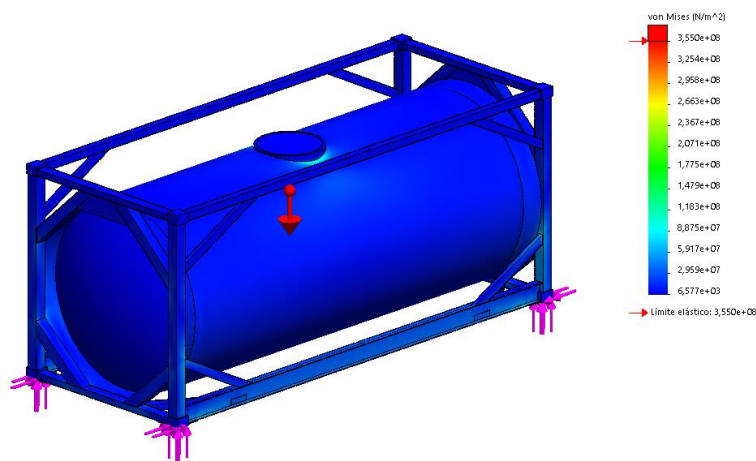


Figura 47: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

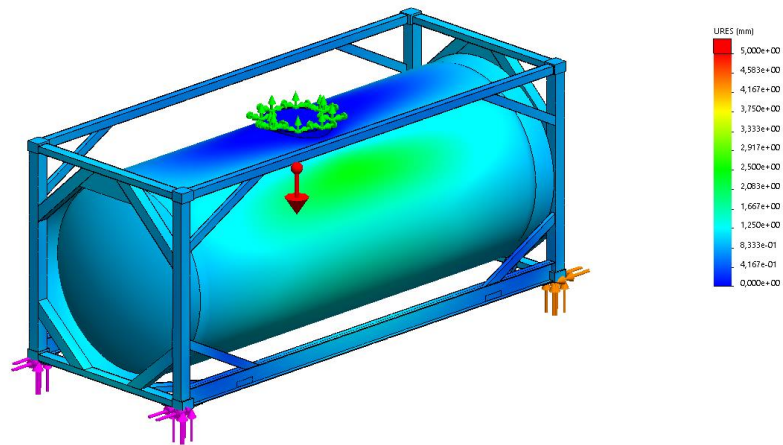


Figura 48: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

4. **Solicitación estática exterior (1496-3/6.5).**

El ensayo comprueba la habilidad del contenedor de aguantar restricción longitudinal externa bajo condiciones dinámicas, que implican aceleraciones de 2g.

La combinación del llenado de carga del contenedor y la tara del contenedor debe ser igual a R.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

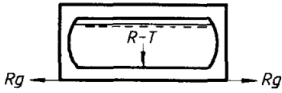
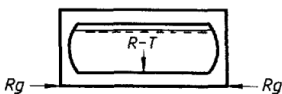
A.6	External restraint (longitudinal) Test No. 4 Applicable to all tank containers	
		

Tabla 62: Solicitaciones ensayo 5. Fuente propia.

Se aplican cargas horizontales (en sentidos de tracción y compresión) en dos de las cantoneras inferiores de un extremo del contenedor de valor:

$$R \cdot g = 230480 \cdot 9,81 = 299008 \text{ N} = 299 \text{ kN/cantonera}$$

Se aplica una fuerza distribuida descendente de valor:

$$R \cdot g = 30480 \cdot 9,81 = 299008 \text{ N} = 299 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijación longitudinal en las cantoneras inferiores del extremo contrario en el que se aplica la fuerza y fijación deslizante en las dos cantoneras del extremo donde se aplica la fuerza.

Resultados

Compresión

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

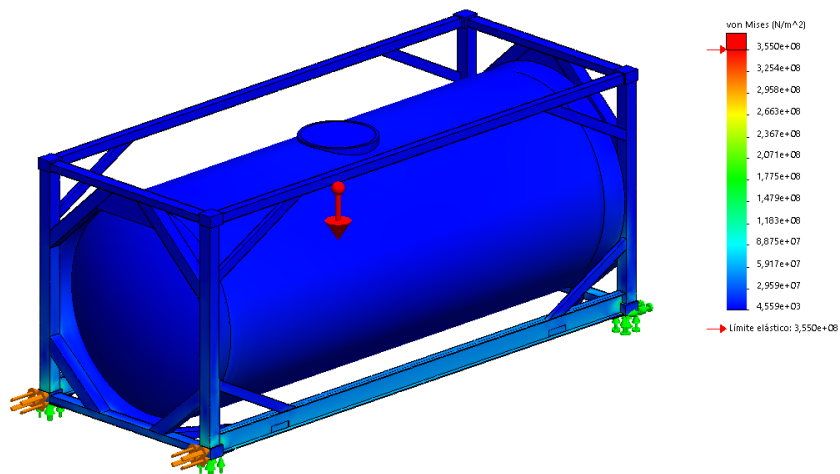


Figura 49: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

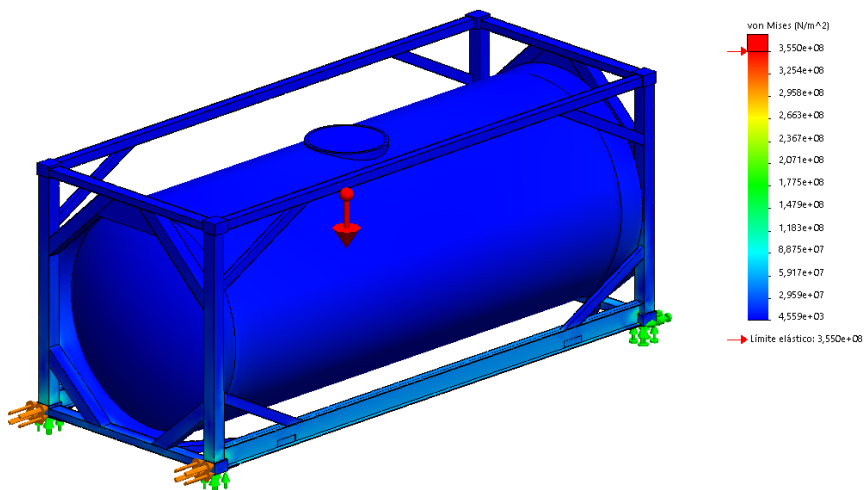


Figura 50: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Tracción

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

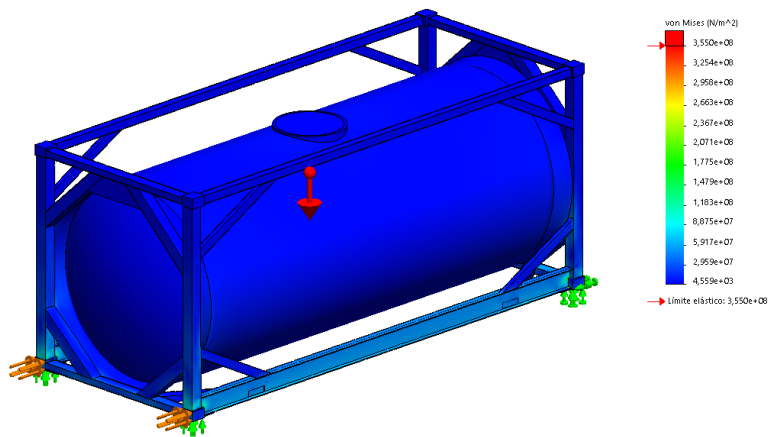


Figura 51: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

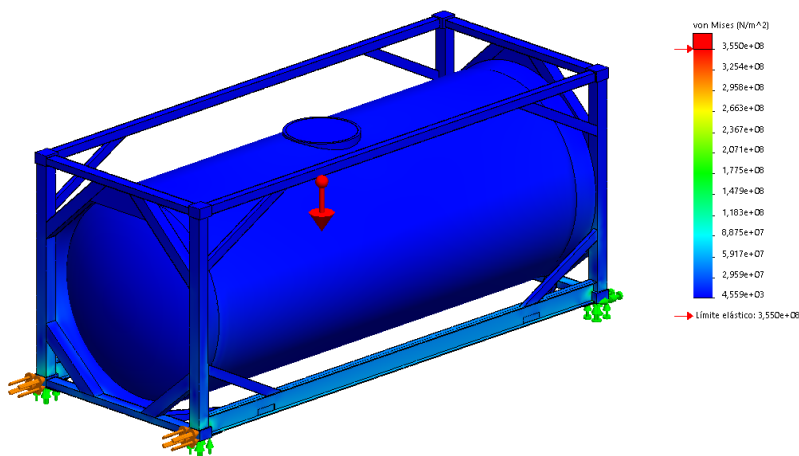


Figura 52: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por

debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

5. Solicitación estática interna longitudinal (1496-3/6.6).

Con este ensayo se prueba la habilidad del contenedor de soportar los efectos de inercia de la carga tanto en la cisterna como en la unión de la cisterna a la estructura. El contenedor debe ser posicionado con su eje longitudinal de manera vertical.

La combinación del llenado de carga del contenedor y la tara del contenedor debe ser igual a R.

Prueba 1

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

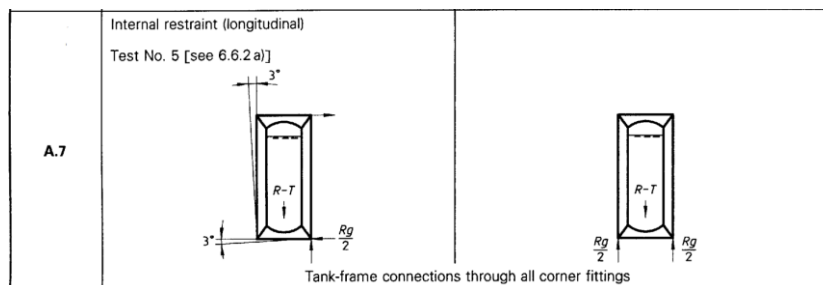


Tabla 63: Solicitaciones ensayo 6. Fuente propia.

Se aplica una fuerza distribuida descendente de valor (carga + tara):

$$R \cdot g = 30480 \cdot 9,81 = 299008 \text{ N} = 299 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijación en las dos cantoneras de la parte inferior del contenedor que quedan debajo una vez posicionado verticalmente. Y fijación horizontal en las cantoneras superiores que quedan debajo una vez posicionado verticalmente.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

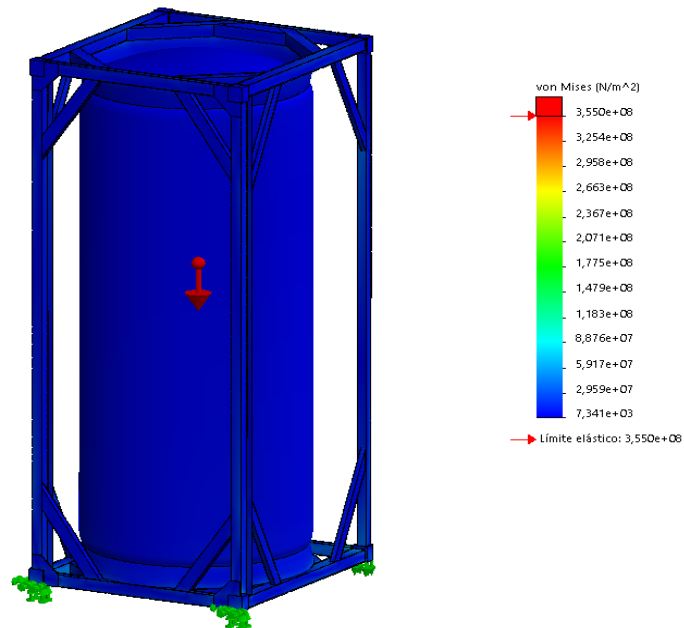


Figura 53: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

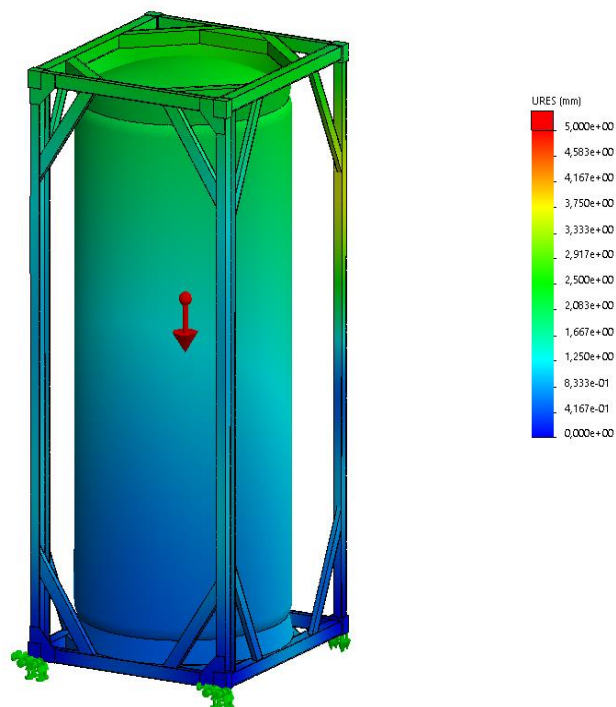


Figura 54: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

6. Solicitación estática interna transversal (1496-3/6.7).

El ensayo comprueba la capacidad del contenedor de soportar los efectos de inercia de la carga tanto en la propia cisterna como en la unión de la cisterna a la estructura bajo condiciones de aceleración lateral.

El contenedor será colocado con su eje transversal en posición vertical (de costado).

La combinación del llenado de carga del contenedor y la tara del contenedor debe ser igual a R.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

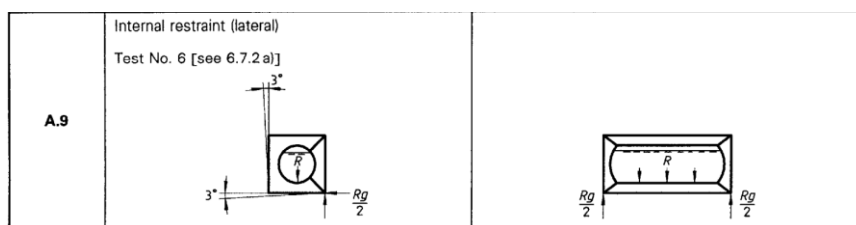


Tabla 64: Solicitaciones ensayo 6. Fuente propia.

Se aplica una fuerza distribuida descendente de valor (carga + tara):

$$R \cdot g = 30480 \cdot 9,81 = 299008 \text{ N} = 299 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijación en las dos cantoneras de la parte inferior del contenedor que quedan debajo una vez posicionado de costado. Y fijación horizontal en las cantoneras superiores que quedan debajo una vez posicionado de costado.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

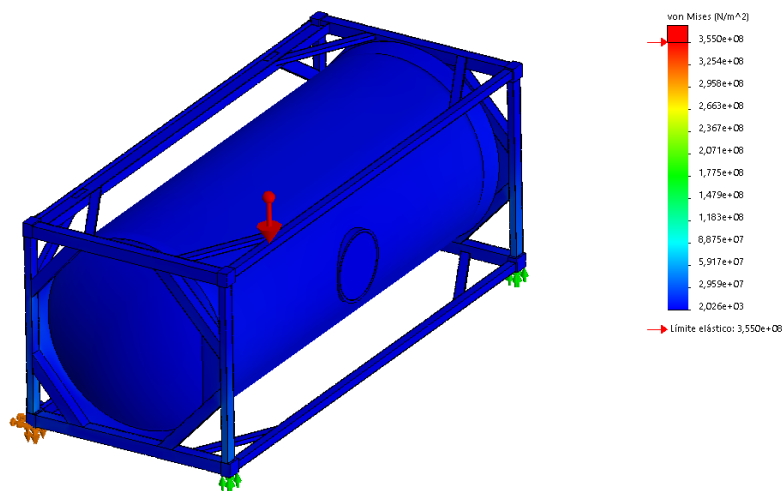


Figura 55: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

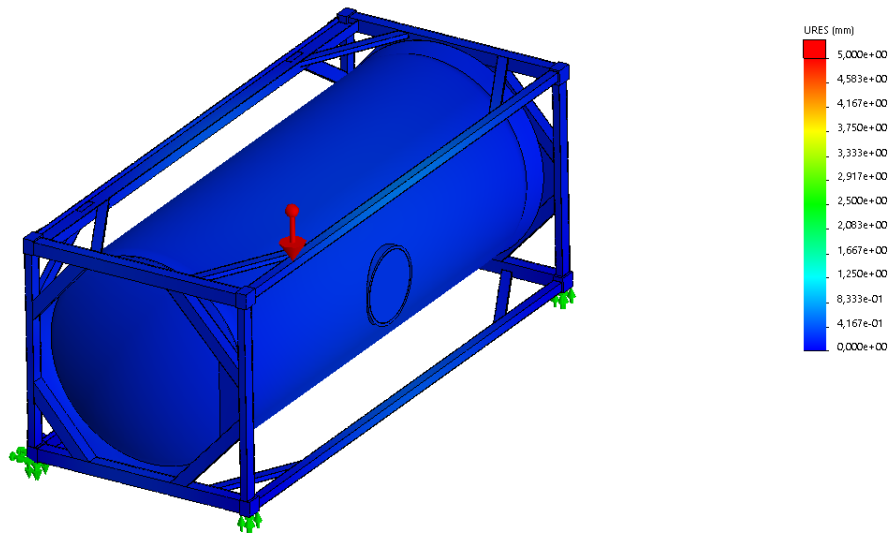


Figura 56: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

7. Rigidez transversal. (1496-3/6.8).

El ensayo prueba la habilidad del contenedor para soportar las fuerzas transversales resultantes del movimiento del buque.

El contenedor estará en condición de tara, es decir vacío.

Se deben aplicar las fuerzas es dos sentidos para realizar el ensayo.

Prueba 1

Las fuerzas se aplican en sentido exterior.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

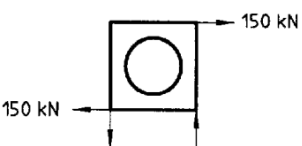
Figure No.	End elevations
A.11	Rigidity (transverse) Test No. 7 

Tabla 65: Solicitaciones prueba 1, ensayo 7. Fuente propia.

Se aplican dos fuerzas de 150 kN en las cantoneras de los marcos como muestra el cuadro. Al ser simétricos los extremos del contenedor solo es necesario hacer las pruebas en uno.

Se aplica una fuerza distribuida en sentido descendente del valor de la tara:

$$T = 6100 \cdot 9,81 = 59841 \text{ N} = 59,8 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones verticales en las dos cantoneras inferiores del marco donde se realiza el ensayo y fijaciones laterales sólo a las cantoneras diagonalmente opuestas a la cantonera donde se está aplicando la carga.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

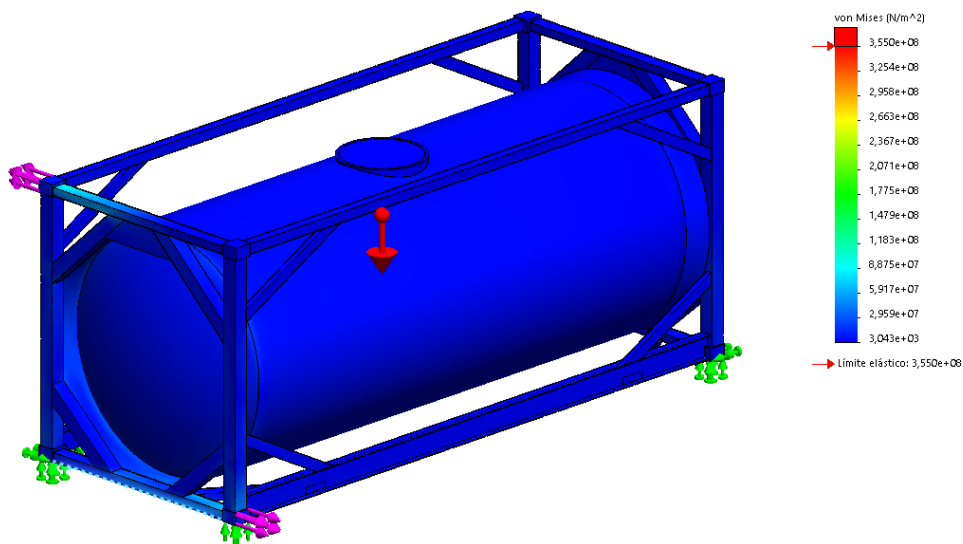


Figura 57: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

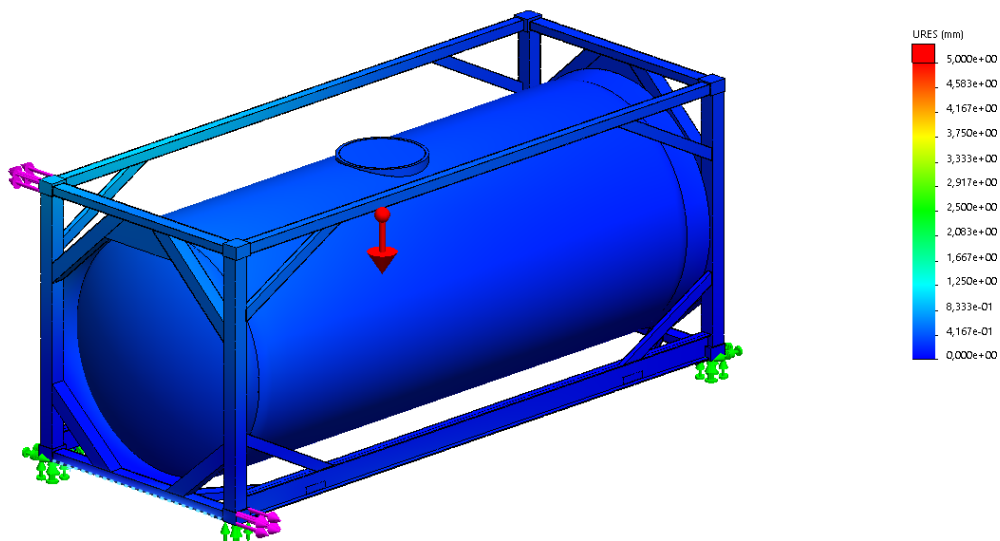


Figura 58 : Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

Prueba 2

Las fuerzas se aplican en sentido interior.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

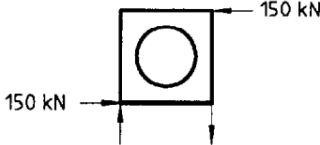
A.12	Rigidity (transverse) Test No. 7	
-------------	-------------------------------------	--

Tabla 66: Solicitaciones prueba 2, ensayo 7. Fuente propia.

Se aplican dos fuerzas de 150 kN en las cantoneras de los marcos como muestra el cuadro. Al ser simétricos los extremos del contenedor solo es necesario hacer las pruebas en uno.

Se aplica una fuerza distribuida en sentido descendente del valor de la tara:

$$T = 6100 \cdot 9,81 = 59841 \text{ N} = 59,8 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones verticales en las dos cantoneras inferiores del marco donde se realiza el ensayo y fijaciones laterales sólo a las cantoneras diagonalmente opuestas a la cantonera donde se está aplicando la carga.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

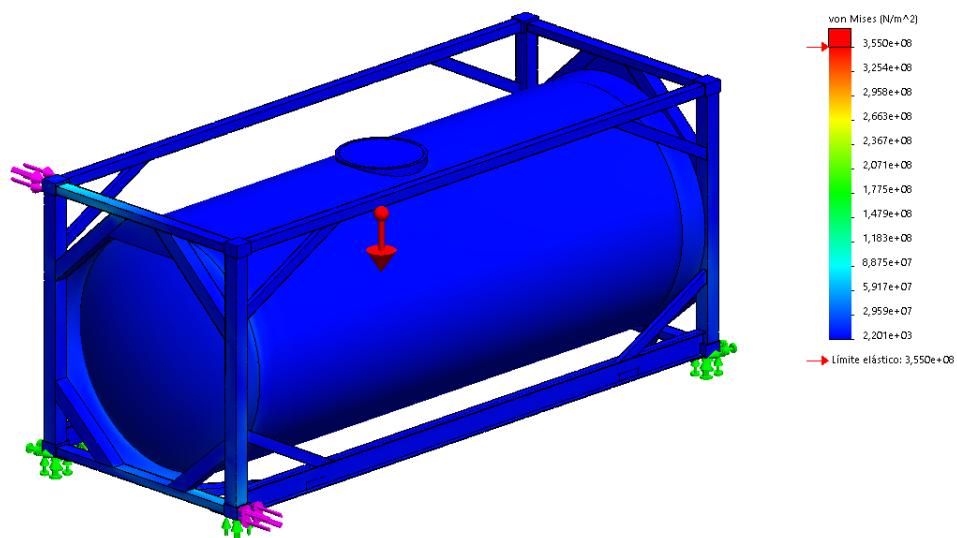


Figura 59: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

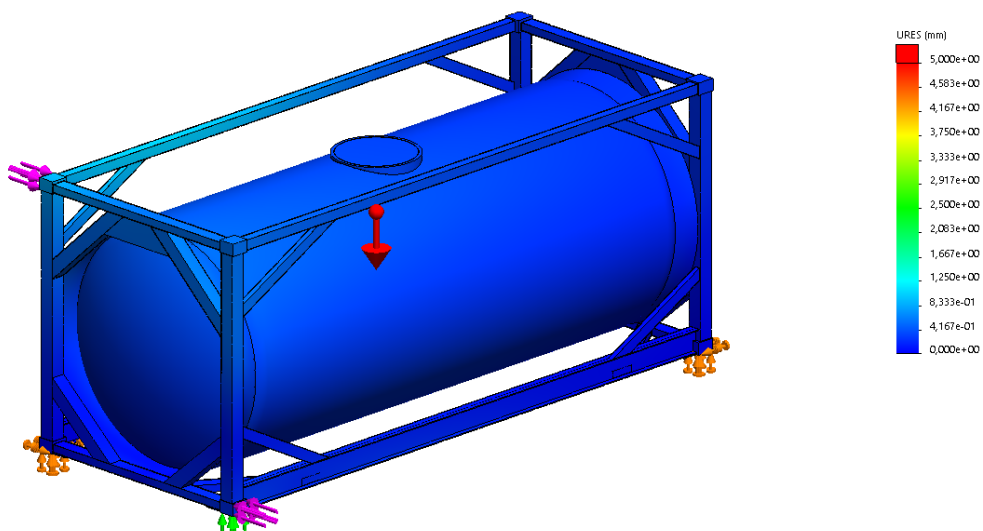


Figura 60: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

8. Rigidez longitudinal. (1496-3/6.9).

El ensayo prueba la habilidad del contenedor para soportar las fuerzas longitudinales resultantes del movimiento del buque.

El contenedor estará en condición de tara, es decir vacío.

Se deben aplicar las fuerzas es dos sentidos para realizar el ensayo.

Prueba 1

Las fuerzas se aplican en sentido exterior.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

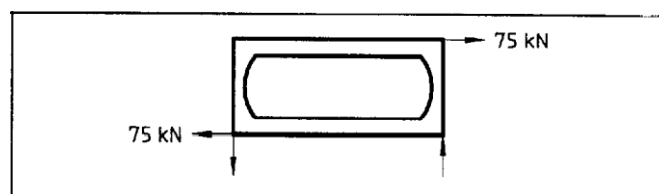


Tabla 68. Solicitaciones prueba 1, ensayo 8. Fuente propia.

Se aplican dos fuerzas de 75 kN en las cantoneras de los marcos como muestra el cuadro. Al ser simétricos los lados del contenedor solo es necesario hacer las pruebas en uno.

Se aplica una fuerza distribuida en sentido descendente del valor de la tara:

$$T = 6100 \cdot 9,81 = 59841 \text{ N} = 59,8 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones verticales en las cuatro cantoneras y fijaciones longitudinales sólo en las cantoneras diagonalmente opuestas a la cantonera donde se está aplicando la carga.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

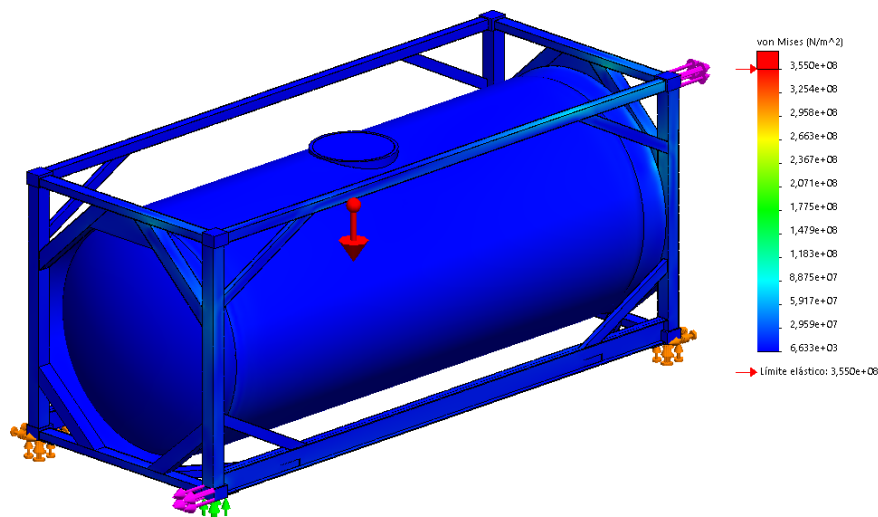


Figura 61: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

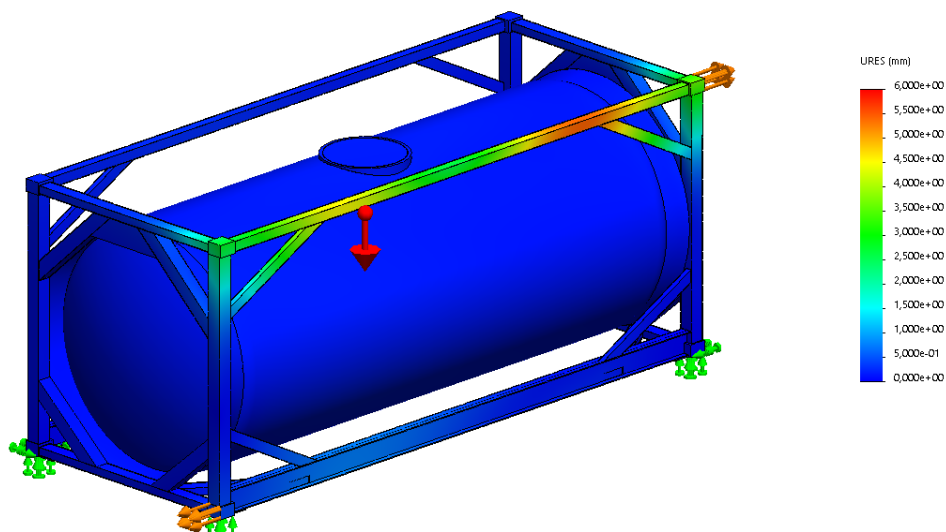


Figura 62: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

Prueba 2

Las fuerzas se aplican en sentido interior.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

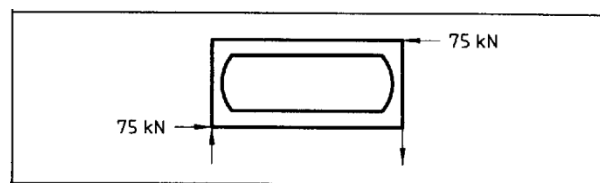


Tabla 68. Solicitaciones prueba 2, ensayo 8. Fuente propia.

Se aplican dos fuerzas de 75 kN en las cantoneras de los marcos como muestra el cuadro. Al ser simétricos los lados del contenedor solo es necesario hacer las pruebas en uno.

Se aplica una fuerza distribuida en sentido descendente del valor de la tara:

$$T = 6100 \cdot 9,81 = 59841 \text{ N} = 59,8 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones verticales en las cuatro cantoneras y fijaciones longitudinales sólo en las cantoneras diagonalmente opuestas a la cantonera donde se está aplicando la carga.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

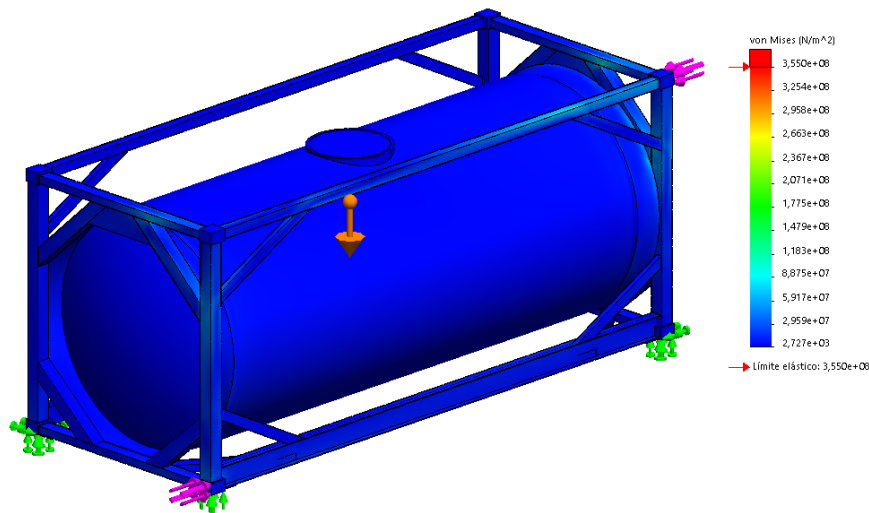


Figura 63: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

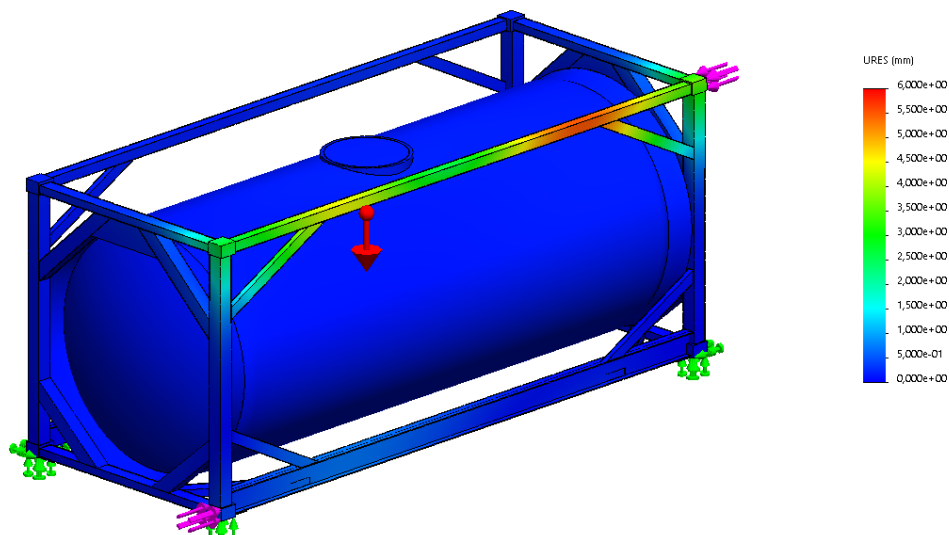


Figura 63: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos dimensionales de la norma ISO 668 para la correcta utilización del equipo.

Resultado del análisis: aceptado.

9. 2g en el sentido de la marcha (ADR/IMDG/ 6.8.2.1.2)

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

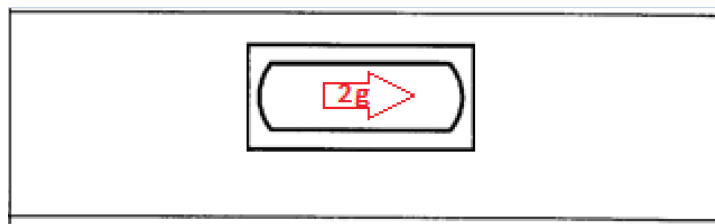


Tabla 69: Solicitaciones ensayo 9. Fuente propia.

Se aplica la fuerza de dos veces el rating del contenedor por la gravedad en el sentido que muestra la imagen.

$$2 \cdot R \cdot g = 2 \cdot 30480 \text{ kg} \cdot 9,81 = 598017 \text{ N} = 590,1 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones rígidas en las cuatro cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

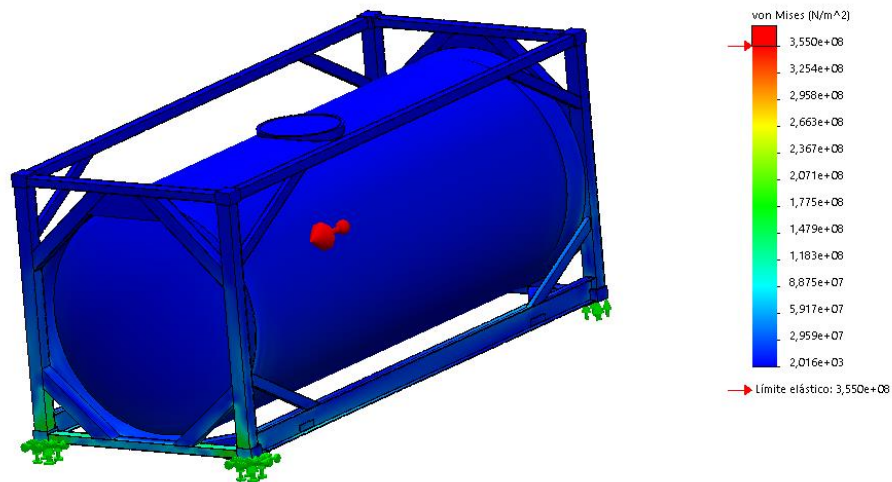


Figura 65: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

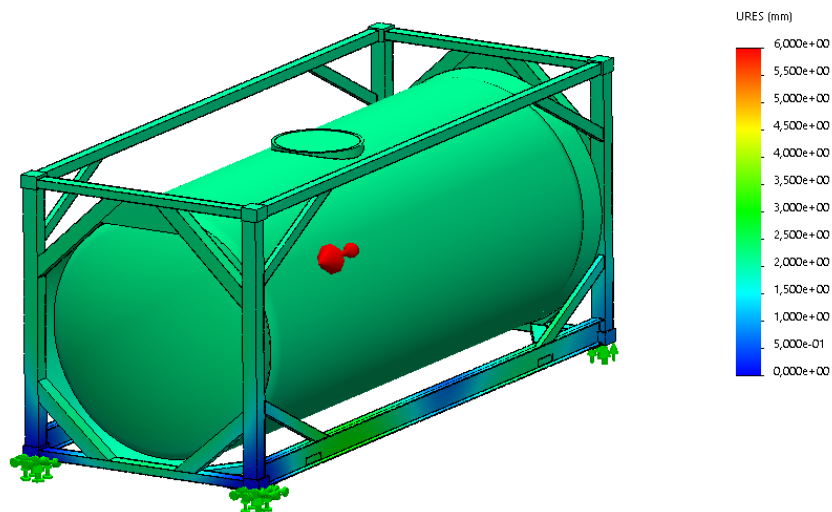


Figura 66: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

Diseño de un contenedor cisterna ISO bajo las normas ADR y IMDG

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos de la norma ADR/IMDG.

Resultado del análisis: aceptado.

10. g en el sentido transversal (ADR/IMDG/ 6.8.2.1.2).

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

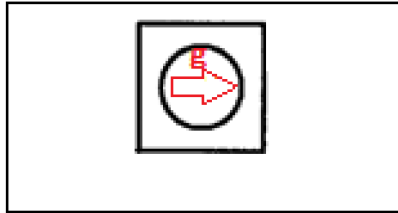


Tabla 70: Solicitaciones ensayo 10. Fuente propia.

Se aplica la fuerza del rating del contenedor por la gravedad en el sentido que muestra la imagen.

$$R \cdot g = 30480 \text{ kg} \cdot 9,81 = 299008 \text{ N} = 299 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones rígidas en las cuatro cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

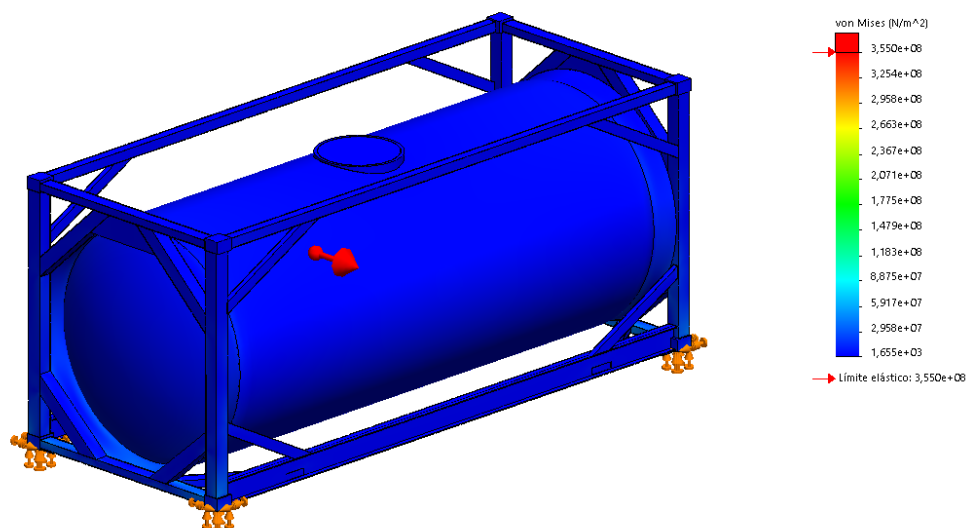


Figura 67: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

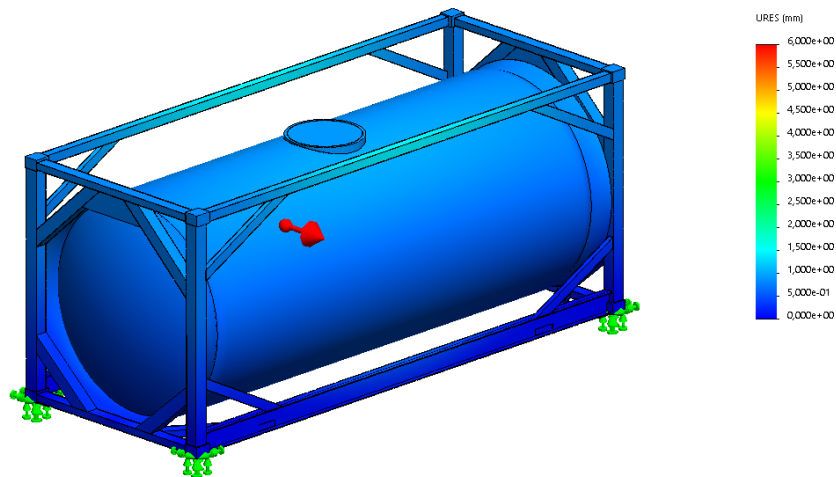


Figura 68: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos de la norma ADR/IMDG.

Resultado del análisis: aceptado.

11. g en el sentido vertical ascendente (ADR/IMDG/ 6.8.2.1.2).

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

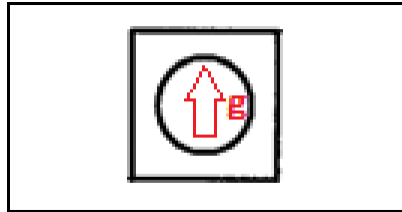


Tabla 71: Solicitaciones ensayo 11. Fuente propia.

Se aplica la fuerza del rating del contenedor por la gravedad en el sentido que muestra la imagen.

$$R \cdot g = 30480 \text{ kg} \cdot 9,81 = 299008 \text{ N} = 299 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones rígidas en las cuatro cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

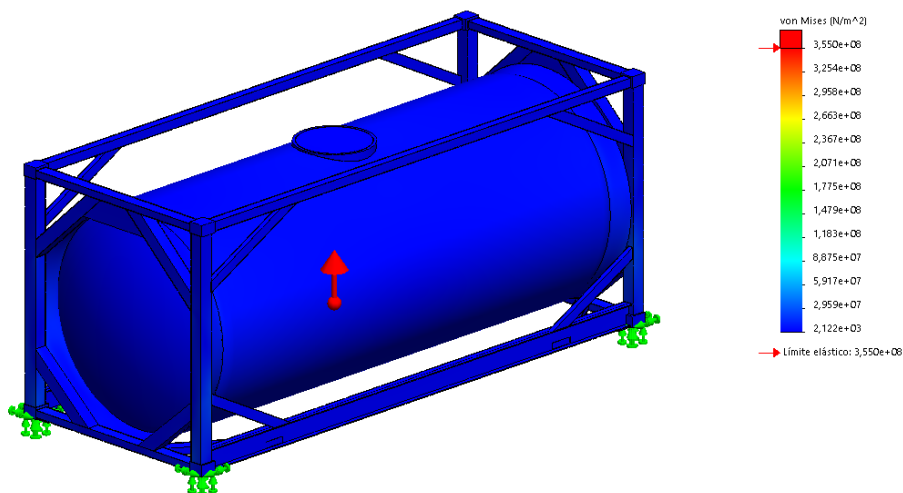


Figura 69: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

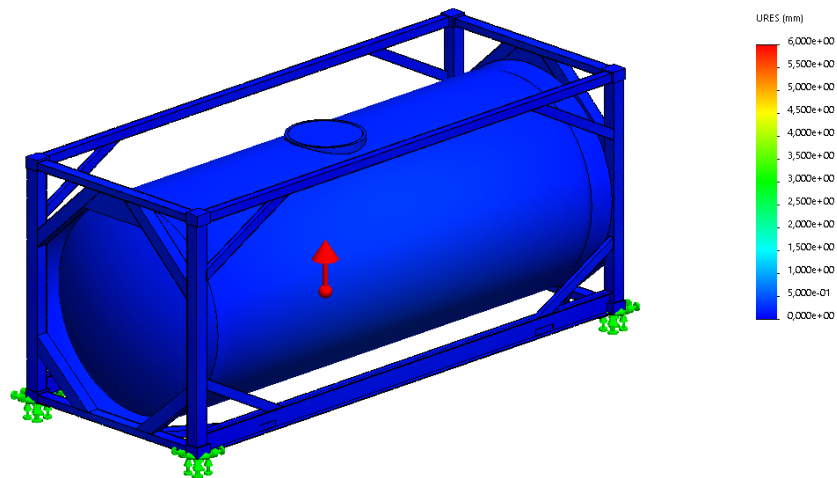


Figura 70: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos de la norma ADR/IMDG.

Resultado del análisis: aceptado.

12. 2g en el sentido vertical descendente (ADR/IMDG/ 6.8.2.1.2).

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

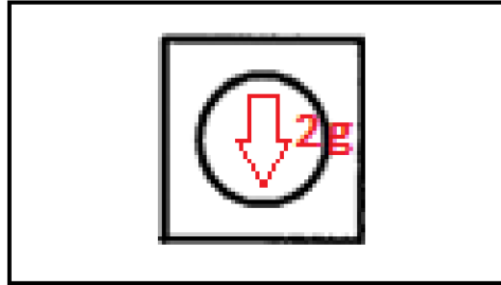


Tabla 72: Solicitaciones ensayo 12.

Se aplica la fuerza de dos veces el rating del contenedor por la gravedad en el sentido que muestra la imagen.

$$2 \cdot R \cdot g = 2 \cdot 30480 \text{ kg} \cdot 9,81 = 598017 \text{ N} = 590,1 \text{ kN}$$

Sujeciones:

Fijaciones rígidas en las cuatro cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

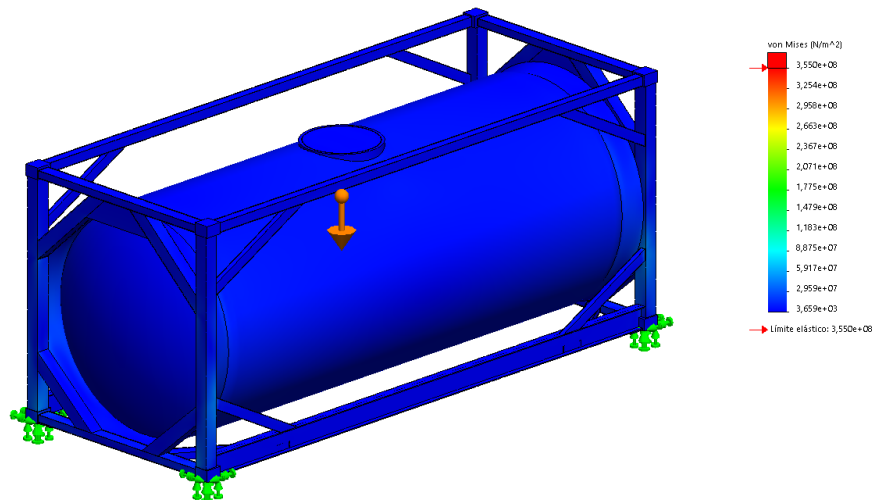


Figura 71: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

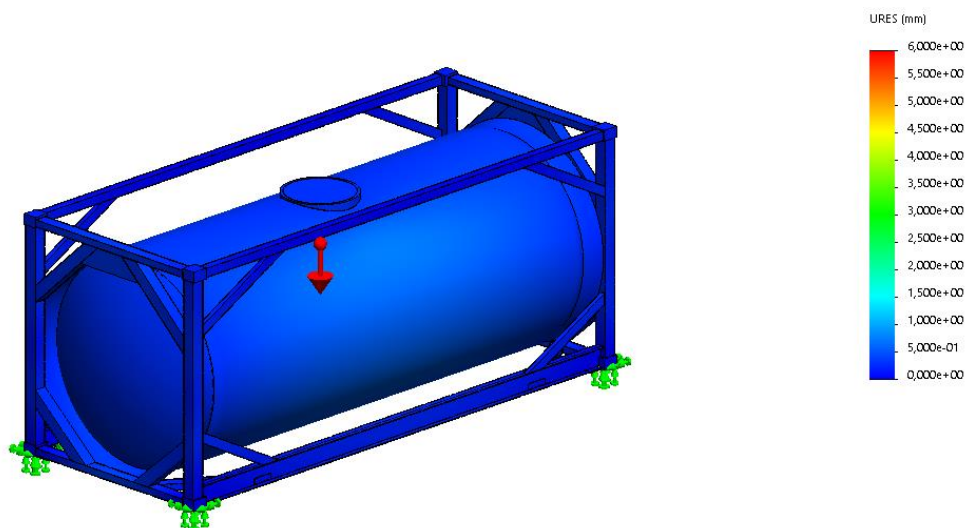


Figura 72: Deformaciones. Fuente propia.

La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos de la norma ADR/IMDG.

Resultado del análisis: aceptado.

13. Prueba hidráulica (ADR/IMDG).

El ADR y el IMDG exponen que los depósitos deben ser diseñados y construidos para resistir una presión de prueba.

Condiciones de ensayo

Solicitaciones:

Se aplica una presión de prueba de 10 bar en el interior de la cisterna.

Sujeciones:

Fijaciones rígidas en las cuatro cantoneras inferiores.

Resultados

En la imagen se muestra el resultado del cálculo de las tensiones de Von Mises con las cargas aplicadas:

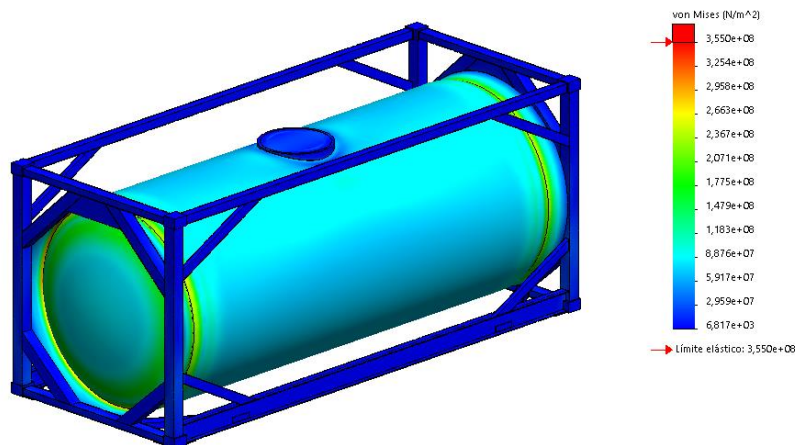


Figura 73: Tensiones de Von Mises. Fuente propia.

La tensión máxima de Von Mises es muy inferior a la tensión del límite elástico del material.

Se expone el resultado del cálculo de las deformaciones de la estructura:

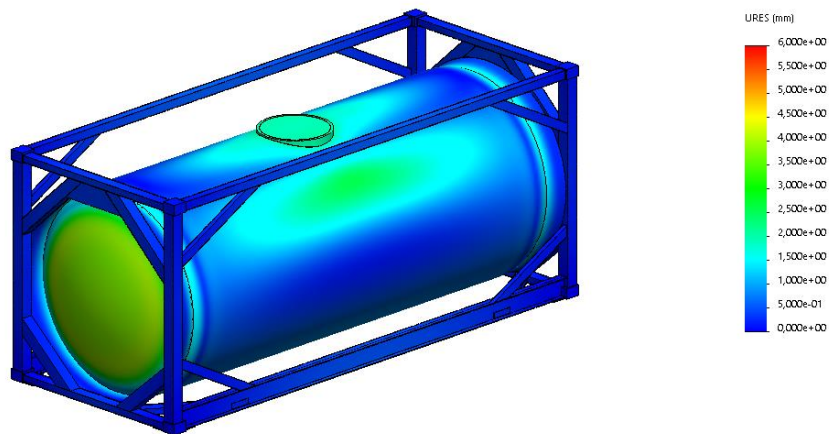


Figura 74: Deformaciones. Fuente propia.

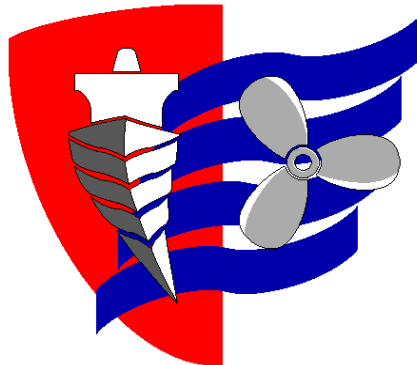
La deformación resultante es menor que las deformaciones permitidas por la norma.

Conclusiones

De acuerdo con los requerimientos de los ensayos no se observan tensiones que provoquen deformaciones permanentes, o roturas y los desplazamientos elásticos observados están por debajo de los requisitos de la norma ADR/IMDG.

Resultado del análisis: aceptado.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



PROCESO DE FABRICACIÓN

Documento 4

Trabajo de fin de grado
Ingeniería Marítima

4. Proceso de fabricación. 128

4.1. Virola. 128

4.2. Estructura. 131

4.3. Pruebas e inspecciones. 135

4.4. Tratamiento térmico de distensionado..... 135

4.5. Pintura. 136

4.6. Tubo buzo. 136

4.7. Montaje final..... 138

4. Proceso de fabricación.

4.1. Virola.

Para empezar, se parte de una plancha de acero P355NL1 de 12 mm de espesor. La medida del desarrollo de la virola viene cortada por el proveedor del material, y la longitud de cada plancha es de 1500 mm.

El desarrollo de la virola que se pide al fabricante, teniendo en cuenta el espesor es:

$$\text{desarrollo} = 2 \cdot \pi \cdot \left(R + \frac{1}{2} \cdot e\right) = 2 \cdot \pi \cdot \left(1150 + \frac{1}{2} \cdot 12\right) = 7263,4 \text{ mm}$$

La longitud de la virola es de 5043 mm, por lo que hay que unir 3 planchas de acero y una cuarta que se cortará a la medida necesaria:

$$5043 - (1500 \cdot 3) = 543 \text{ mm}$$

Así que, se parte de las siguientes planchas:

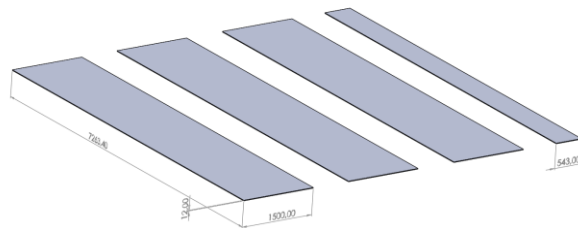


Figura 75: Planchas cortadas. Fuente propia.

Se unen entre sí con el procedimiento homologado de soldadura por arco sumergido:

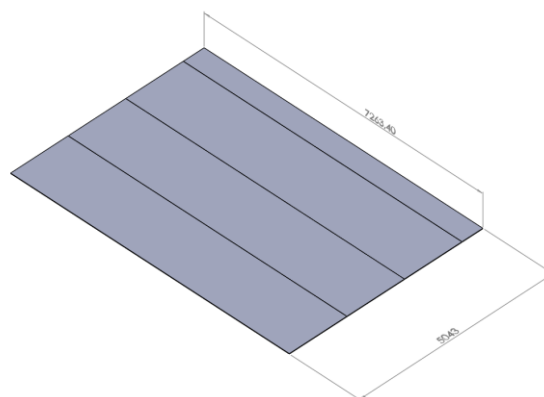


Figura 76: Planchas unidas. Fuente propia.

Posteriormente, se introduce la plancha resultante en un rodillo de 6 m como el que se muestra en la siguiente imagen:



Figura 77: Rodillo. Fuente: Cisternas Cobo.

Se curva de manera que quede de forma circular y posteriormente se unen los dos extremos también con el procedimiento homologado de arco sumergido.

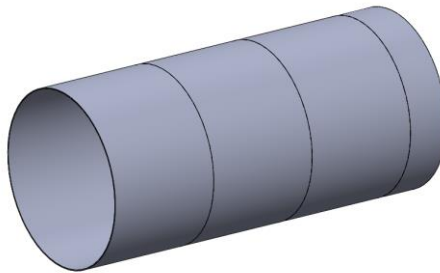


Figura 78: Chapas viroladas. Fuente propia.

A continuación, se procede a hacer la apertura de la boca de hombre. Se dibuja sobre la virola, en el centro de esta (a 2521,5 mm), una circunferencia de 410 mm de radio. Después, se procede a cortar:

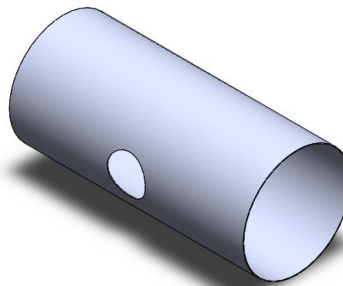


Figura 79: Virola con abertura. Fuente propia.

Los fondos son conformados en caliente por una empresa especializada. El conformado en caliente consiste en el calentamiento de una chapa en un horno para

su posterior modelación con la ayuda de una prensa. Recibe posteriormente un tratamiento térmico de normalizado.

Se coloca la virola sobre viradores con la ayuda de grúas para facilitar la unión a tope del fondo con la virola. Se suelda en una columna de soldadura por arco sumergido:

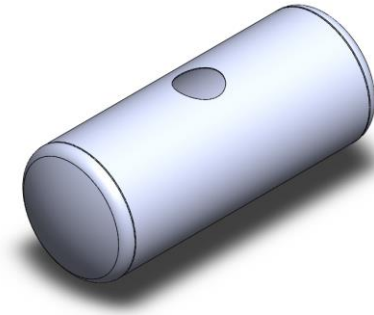


Figura 80: Virola con fondos. Fuente propia.

Para la fabricación de los conos de unión de la virola a la estructura, se dibuja el desarrollo del cono sobre una chapa y se corta:

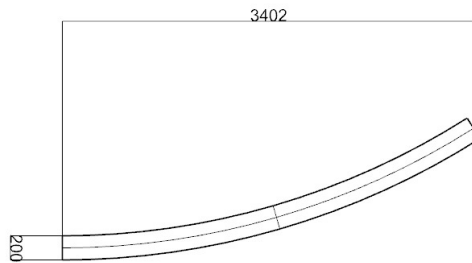


Figura 81: Desarrollo del cono. Fuente propia.

Posteriormente se virola de manera que quede cerrado y se suelda con arco sumergido:



Figura 82: Cono de unión. Fuente propia.

Se sueldan los conos a la virola en una columna de soldadura por arco sumergido:

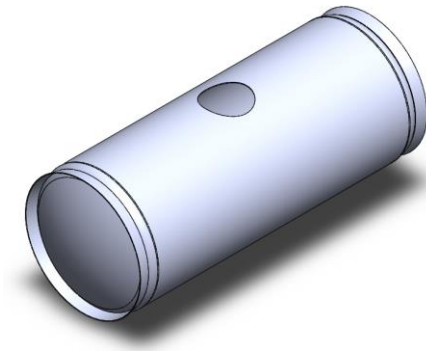


Figura 83: Conos unidos a la virola. Fuente propia.

La brida de la boca de hombre se fabrica y mecaniza en una empresa especializada.

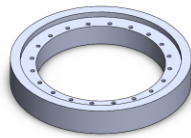


Figura 84: Brida. Fuente propia.

Se suelda a la virola con MAG de manera que penetre al 100% la soldadura:



Figura 85: Unión de brida a la cisterna. Fuente propia.

4.2. Estructura.

Se preparan las chapas que facilitan la unión de la cisterna y la estructura. Se dibuja el desarrollo de la pieza en una plancha de 12 mm:

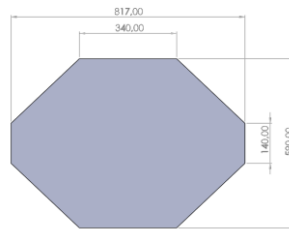


Figura 86: Desarrollo de chapa de unión.

Una vez cortado el desarrollo, se pliega con una máquina plegadora:

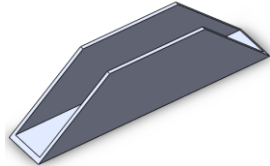


Figura 87: Chapa de unión.

Para la fabricación de la estructura, se parte de tubos cuadrados pedidos al proveedor de la medida indicada. Estos tubos se cortan con una sierra de cinta a la medida.



Figura 88: Sierra de cinta industrial. Fuente: Maquituls.

Posteriormente se va conformando la estructura. Primero se monta con escuadras y se va dando puntos de unión para armar la parte inferior y superior:

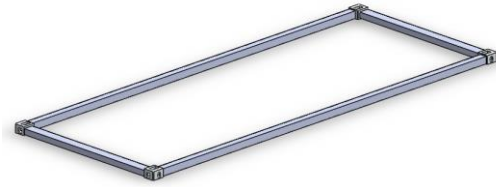


Figura 89: Marco superior de la estructura. Fuente propia.

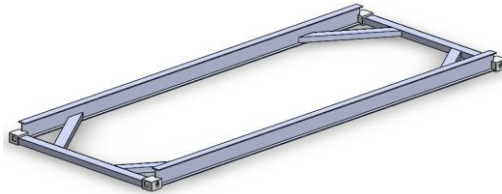


Figura 90: Marco inferior de la estructura. Fuente propia.

Con ayuda de grúas se coloca la cisterna en el centro de la estructura y se apoya sobre viradores. Se centra de manera que la boca de hombre quede con la cara hacia arriba. Se puntea la cisterna en el marco:



Figura 91: Montaje de la estructura. Fuente propia.

A continuación, se va montando la estructura escuadrando y nivelando alrededor de la cisterna. Se colocan los marcos laterales, donde se puntea la cisterna:

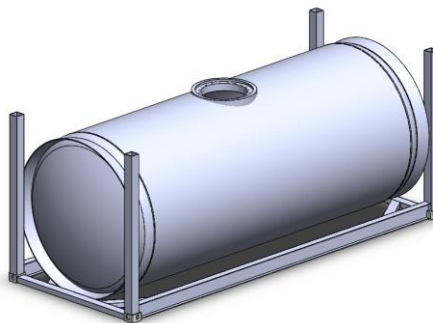


Figura 92: Montaje de la estructura. Fuente propia.

Se puntean los refuerzos inferiores:

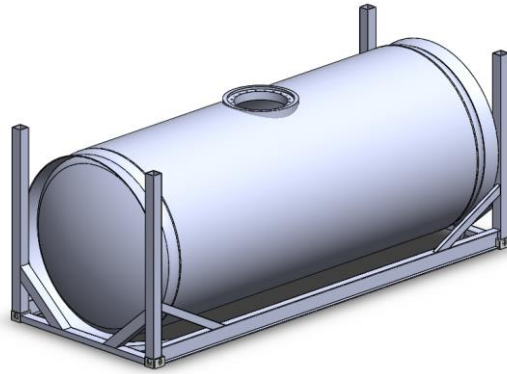


Figura 93: Montaje de la estructura. Fuente propia.

Se coloca la parte superior de la estructura y los refuerzos laterales y se puntean:

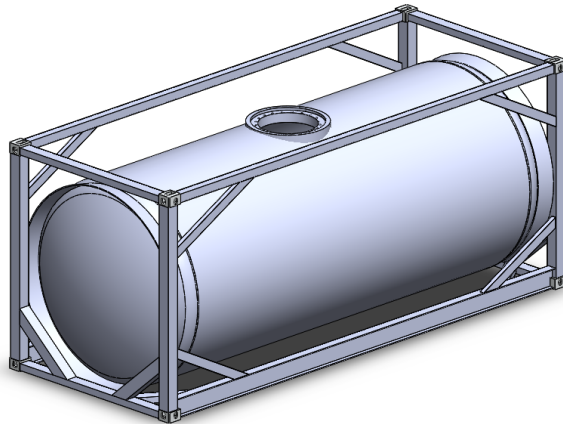


Figura 94: Montaje de la estructura. Fuente propia.

Aparte, se sueldan los refuerzos superiores de los marcos con la chapa de unión de la estructura:

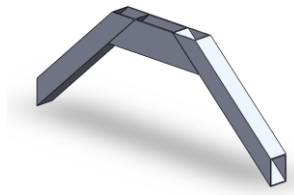


Figura 95: Refuerzos y chapa de unión. Fuente propia.

Para finalizar, se puntea la pieza anterior con el resto de la estructura, se comprueba que todo está escuadrado y bien colocado y se suelda todo con MAG:

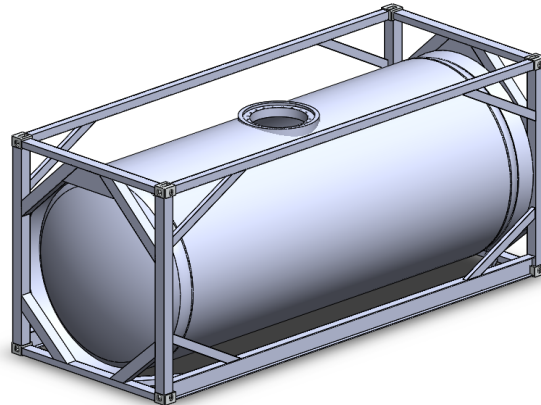


Figura 96: Montaje de la estructura. Fuente propia.

4.3. Pruebas e inspecciones.

Una vez terminado todos los procesos de soldadura del depósito, se procede a la realización de los ensayos no destructivos y pruebas reglamentarias.

- Prueba hidráulica a 10 bar.
- Inspección visual de los cordones.
- Radiografiado del 100% de los cordones de soldadura.

4.4. Tratamiento térmico de distensionado.

Siguiendo las instrucciones del ADR/IMDG punto 6.8.5.1. se procede a la realización del tratamiento térmico del distensionado, la siguiente gráfica es típica del distensionado de un depósito de estas características:

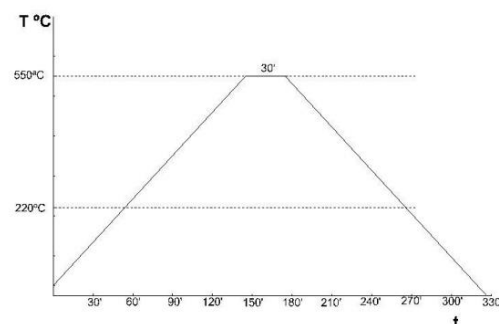


Figura 97: Gráfica de distensionado. Fuente propia.

4.5. Pintura.

Antes del montaje del resto de componentes, se procede a realizar el pintado del equipo para su utilización en condiciones marítimas. Este consiste en:

- Granallado.
- Imprimación Epoxy.
- Pintura de esmalte de acabado Epoxy hasta un espesor de 55 μm .

4.6. Tubo buzo.

Para unir los tubos buzo a las válvulas de fase líquida, se desmonta la válvula de manera que queda libre la brida inferior:



Figura 98: Brida inferior de la válvula de fase líquida. Fuente propia.

Para fabricar el tubo buzo se corta un tubo de diámetro exterior 48 mm y espesor 4 mm con una longitud de 1960 mm.

Se dan dos quiebros de 155° en una máquina curvadora de tubos como muestra el dibujo:

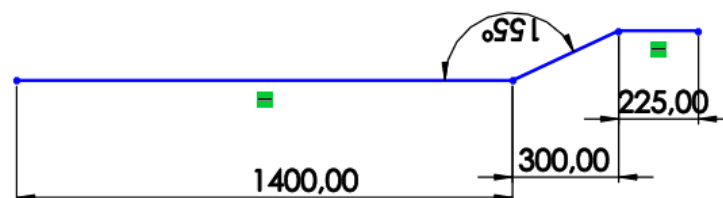


Figura 99: Croquis del tubo buzo. Fuente propia.

Finalmente, el resultado debe ser el siguiente:

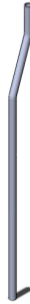


Figura 100: Tubo buzo. Fuente propia.

Se preparan los bordes del tubo y se suelda a la brida de la válvula (se preparan las dos bridas de las válvulas de fase líquida):

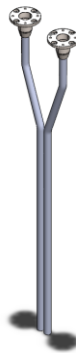


Figura 101: Tubos buzo unidos a las bridas. Fuente propia.

A continuación, se mecaniza en una empresa especializada la tapa de la boca de hombre y se sueldan las bridas de las cuatro válvulas en ella:

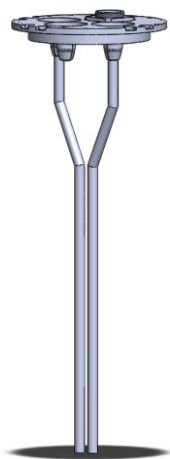


Figura 102: Unión tapa con bridas de las válvulas. Fuente propia.

A continuación, se sueldan chapas de protección y soportes en la virola donde van colocados los equipos (son comprados a proveedores): domo, escaleras, pasarelas...

4.7. Montaje final.

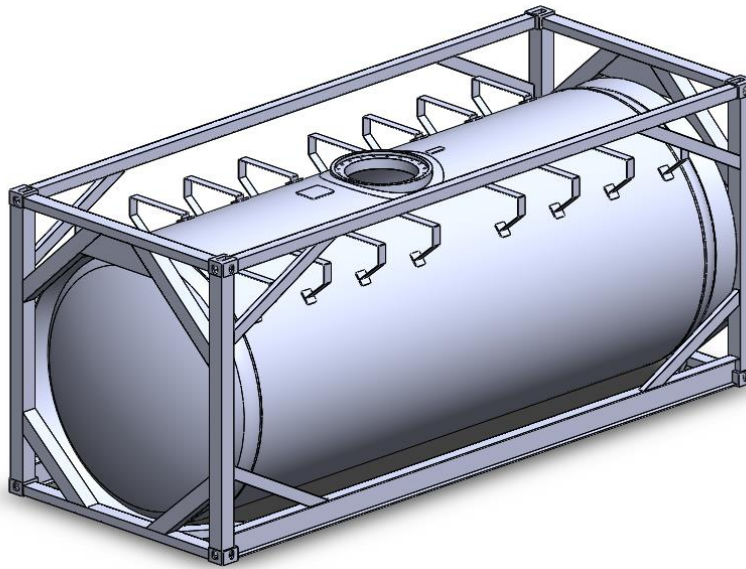


Figura 103: Soportes soldados a la cisterna. Fuente propia.

Se sueldan los equipos:

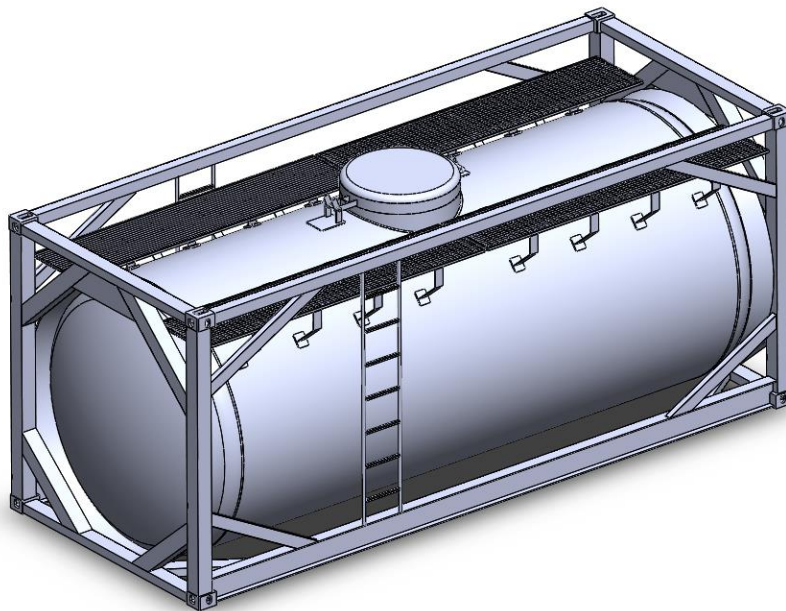


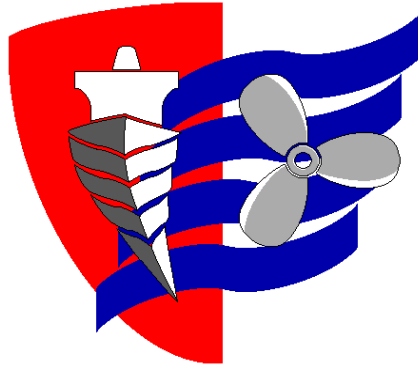
Figura 104. Montaje de los equipos. Fuente propia.

Una vez aspirado el interior del contenedor se coloca la tapa, se hace un apriete dinamométrico de los tornillos según aconseje el fabricante de estos. Y se montan las válvulas.

Se procede a un inertizado del recipiente nitrógeno a la presión de 2 bares y se verifica la estanqueidad de todos los equipos.

Por último, se colocan los carteles y paneles previamente nombrados.

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



PRESUPUESTO

Documento 5

Trabajo de fin de grado

Ingeniería Marítima

5. Presupuesto

ESTRUCTURA	S 275 JR	1,44	€/kg	
	Peso/Unidad	Unidades	Peso (kg)	Precio (€)
Marco				
140x140x8	40,2	4	160,9	231,7 €
140x80x4	14,3	4	57,4	82,6 €
Largueros				
100x100x3	26,5	2	52,9	76,2 €
Doble T	71,9	2	143,8	207,1 €
Refuerzos				
140x140x5	13,1	4	52,4	75,5 €
140x140x5	10,4	4	41,4	59,7 €
100x50x3	4,6	8	36,8	53,0 €
Chapa unión	35,3	2	70,6	101,7 €
	Precio/Unidad			
Cantoneras	60	8		480,0 €
TOTAL				1367,4 €

RECIPIENTE	P 355 NL1	1,8	€/kg	
	Peso/Unidad	Unidades	Peso (kg)	Precio (€)
Fondos	485,4	2	970,9	1747,5 €
Virola	3370,6	1	3370,6	6067,1 €
Cono unión	67,6	2	135,1	243,2 €
TOTAL				8057,8 €

EQUIPOS	Unidades		Precio/unidad	Precio (€)
Pasarelas	2		270	540 €
Escaleras	2		50	100 €
TOTAL				640 €

COMPONENTES	Unidades		Precio/Unidad	Precio (€)
Tapa boca de carga	1		1500	1500 €
Brida boca de carga	1		1200	1200 €
Juntas teflón	1		300	300 €
Válvula de seguridad Fort Vale	1		1300	1300 €
Válvulas Phonix fase gas	1		2100	2100 €
Válvula Phonix fase líquida	2		2100	4200 €
Tornillería				1200 €
TOTAL				11800 €

PINTURA	Unidades		Precio/Unidad	Precio (€)
Granallado	1		500	500 €
Pintura	1		600	600 €
Rotulaciones	1		250	250 €
TOTAL				1350 €

Diseño de un contenedor cisterna ISO bajo las normas ADR y IMDG

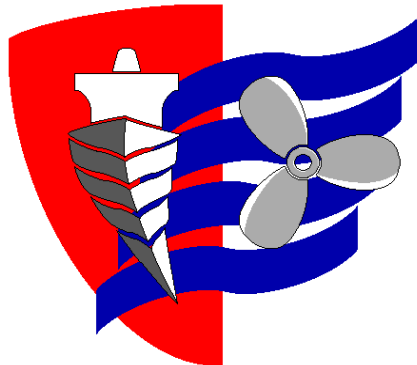
RESUMEN MATERIALES		Precio	
Estructura		1367,4	€
Recipiente		8057,8	€
Equipos		640	€
Componentes		11800	€
Pintura		1350	€
TOTAL		23215,2	€

VARIOS		Precio	
Ensayos homologación		1200	€
Inspección Organismo Notificado		500	€
Radiografiado		1200	€
TOTAL		2900,0	€

	Horas	Precio/hora	Precio	
MANO DE OBRA	550	40	22000	€
		TOTAL	22000	€

COSTE TOTAL DEL CONTENEDOR		48115,2	€
BENEFICIO INDUSTRIAL	10%	4811,5	€
PVP recomendado		52926,7	€
	PRECIO FINAL	55000	€

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



BIBLIOGRAFÍA Y DOCUMENTACIÓN

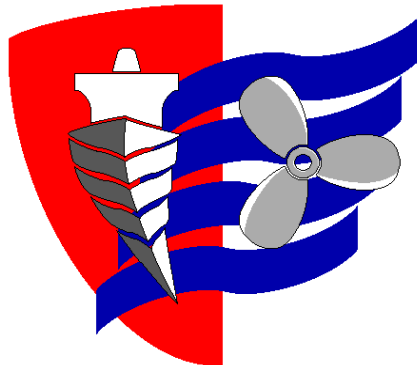
Documento 6

Trabajo de fin de grado
Ingeniería Marítima

6. Bibliografía y documentación.

1. James M. Gere, Timoshenko: Resistencia de Materiales. Ed. Ediciones Paraninfo, 2004.
2. ADR 2013. Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera. BOE, Ministerio de Fomento.
3. Reglamento de Tráfico. Dirección General de Tráfico.
4. Catálogo de válvulas, tuberías y bocas de hombre. Disponible en web: <http://www.fortvale.com>
5. IMDG 2011. Código Marítimo Internacional de mercancías peligrosas.
6. UNE-EN 10028-3. Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 3: aceros soldables de grano fino en condición de normalizado.
7. UNE-EN 13445-3. Recipientes a presión no sometidos a la acción de la llama. Parte 3: Diseño.
8. UNE-EN 14025. Cisternas para el transporte de mercancías peligrosas. Cisternas metálicas sometidas a presión. Diseño y construcción.
9. UNE-EN 10025-2. Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.
10. UNE EN-ISO 6346. Contenedores para el transporte de mercancías. Codificación, identificación y marcado.
11. UNE 49756-2. Ensayos para contenedores-cisternas de la serie 1 para líquidos y gases.
12. UNE 117101. Contenedores de la serie 1. Clasificación, dimensiones y masas brutas máximas.
13. UNE 117102-1. Contenedores de la serie 1. Especificaciones y ensayos. Parte 1: contenedores de uso general para mercancías diversas.
14. CSC. Convenio internacional sobre la seguridad de los contenedores.
15. ISO 1116. Contenedores de la serie 1. Esquineros. Especificación.
16. ISO 1496-3. Series 1 freight containers. Part 3: tank containers for liquids, gases, and pressurized dry bulk.
17. ISO 668. Series 1 freight containers. Classification, dimensions, and ratings.

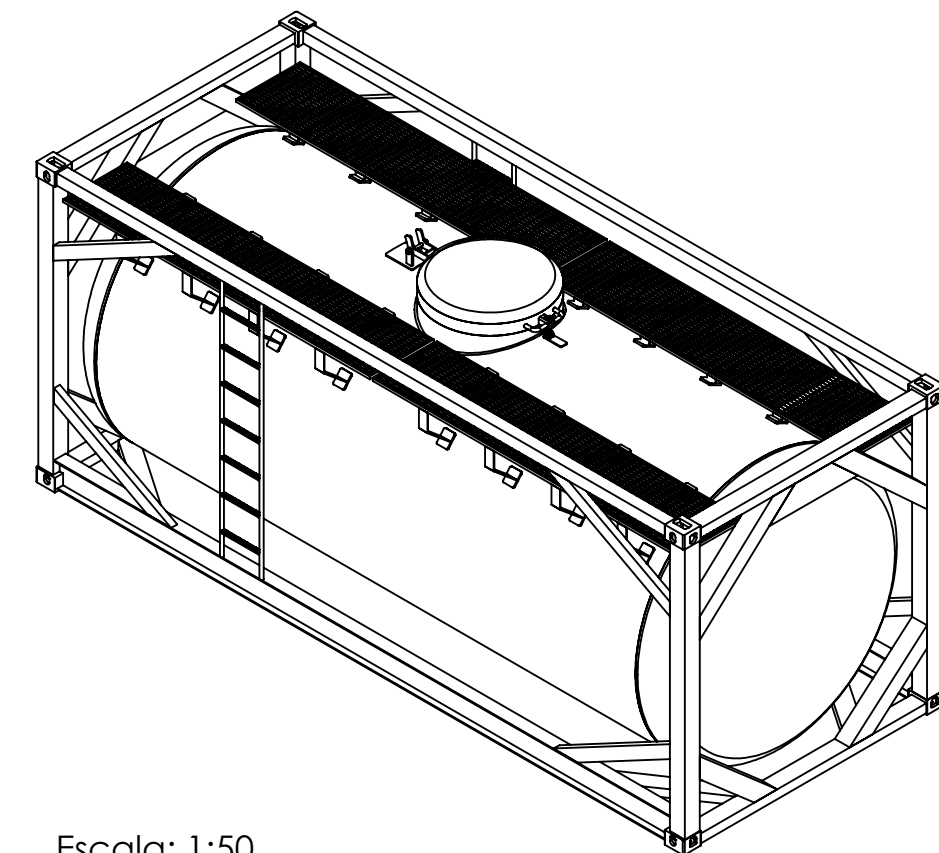
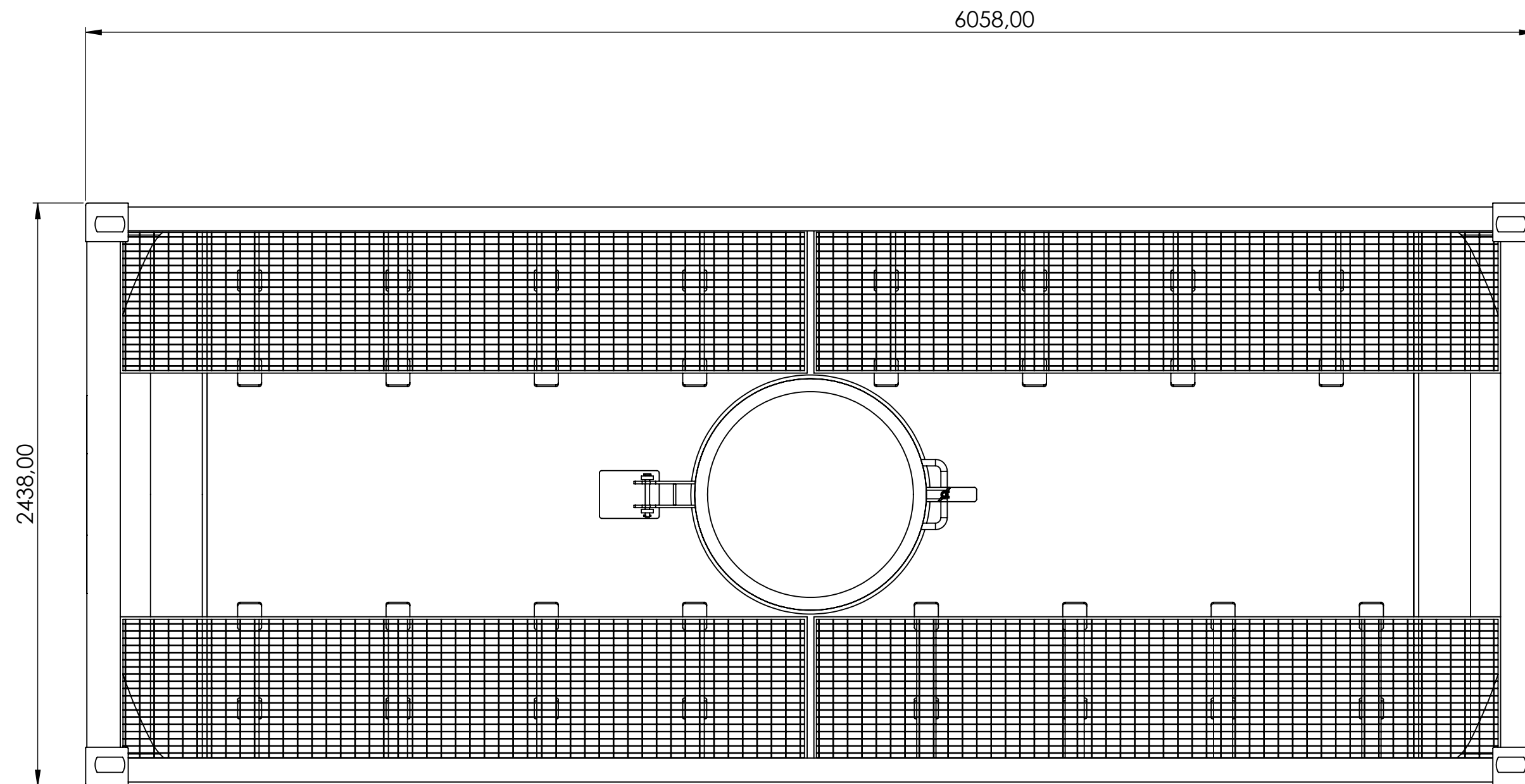
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



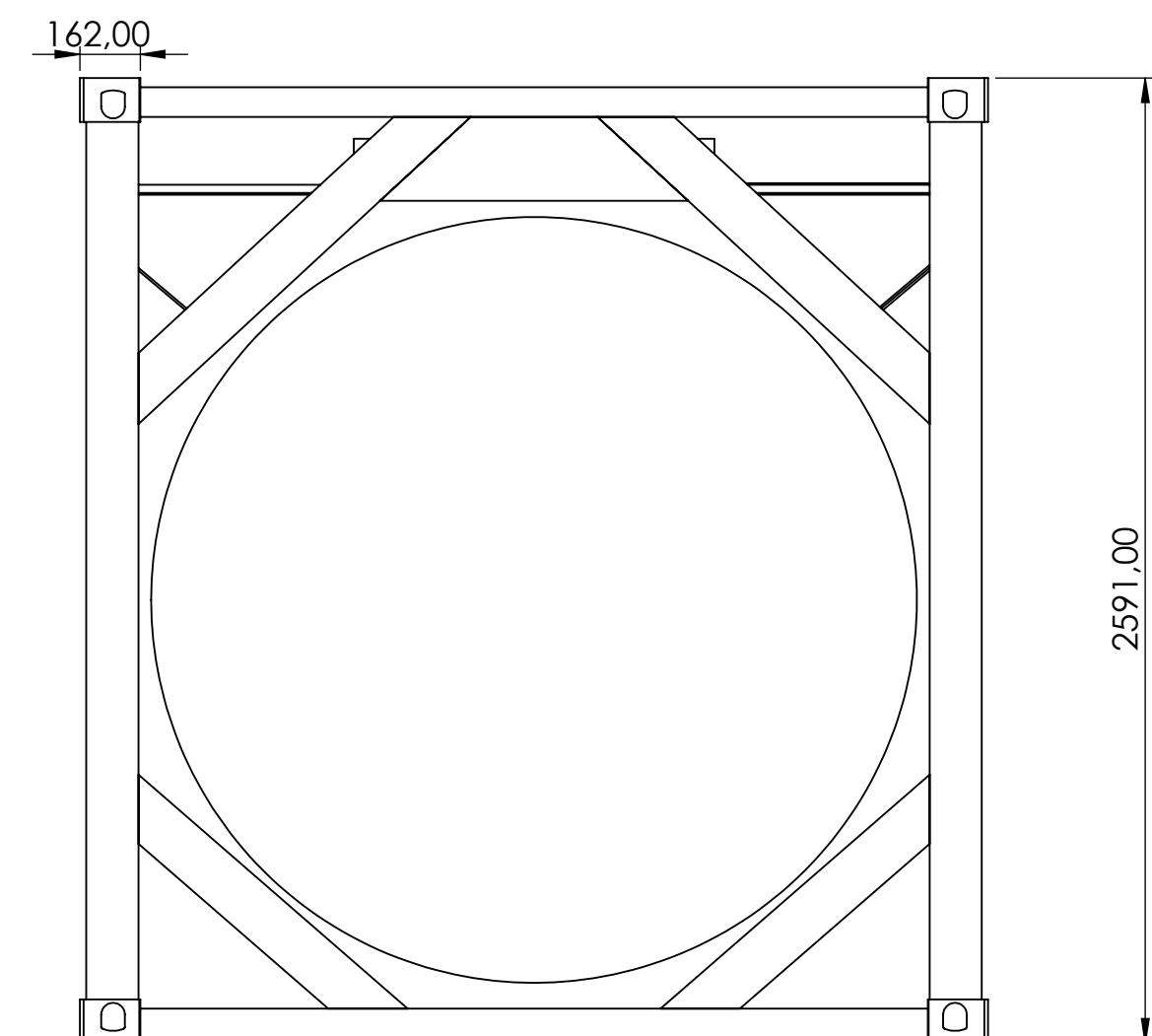
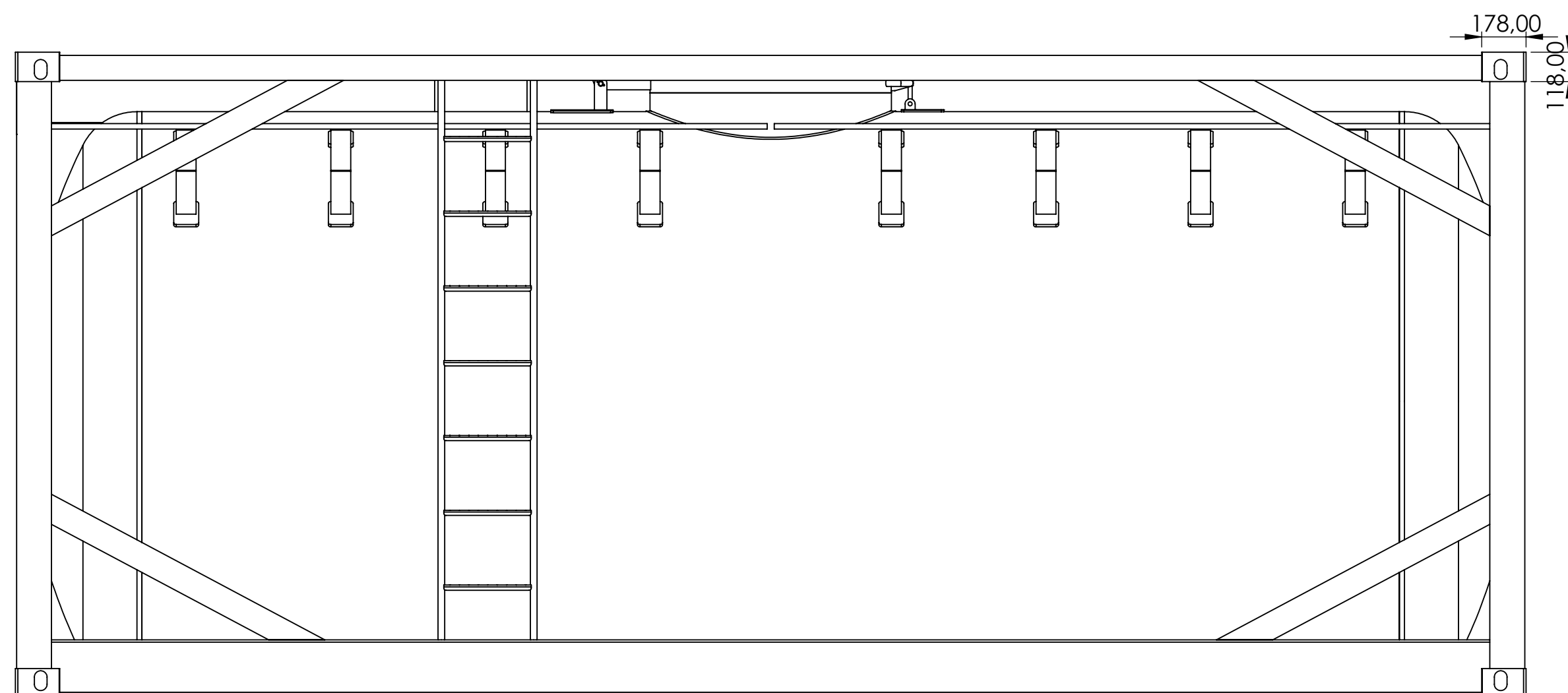
DISPOSICIÓN GENERAL

Documento 7

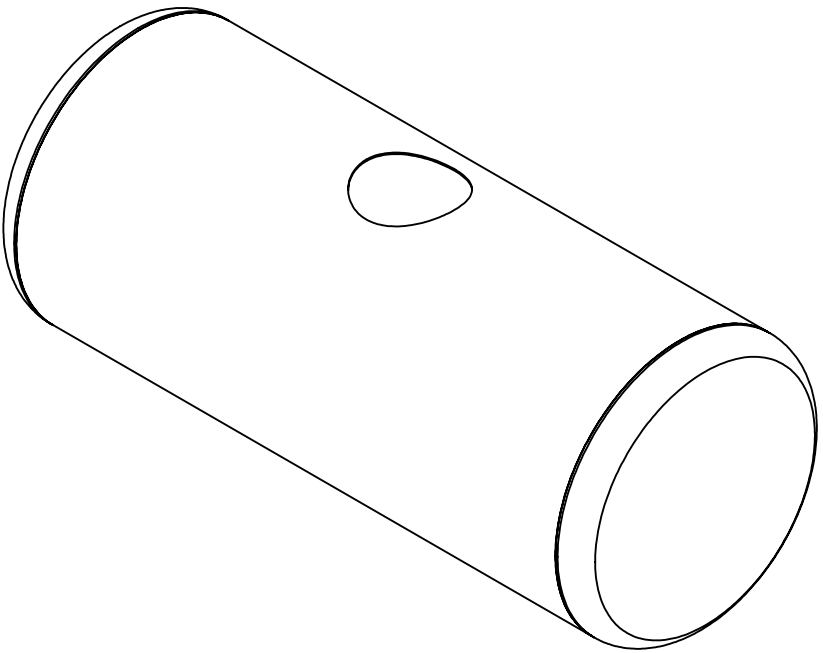
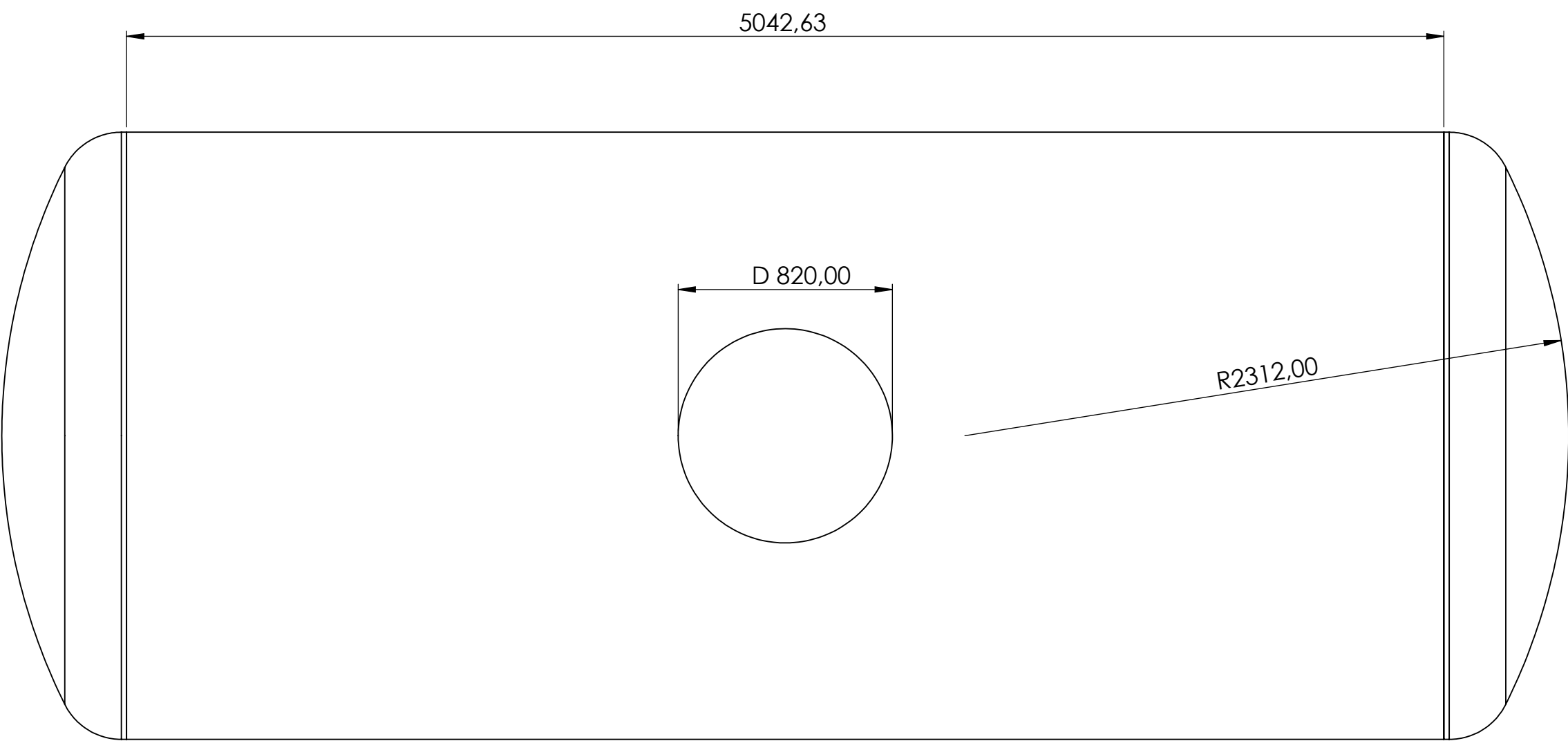
Trabajo de fin de grado
Ingeniería Marítima



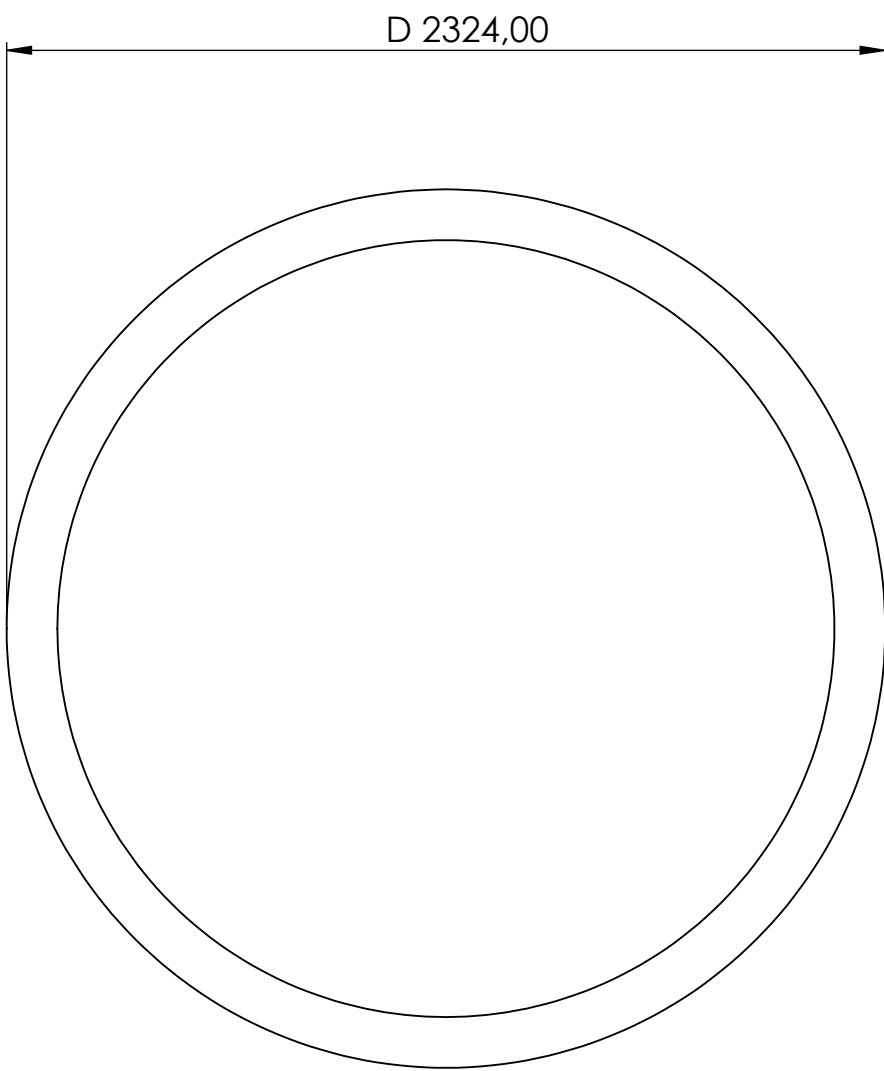
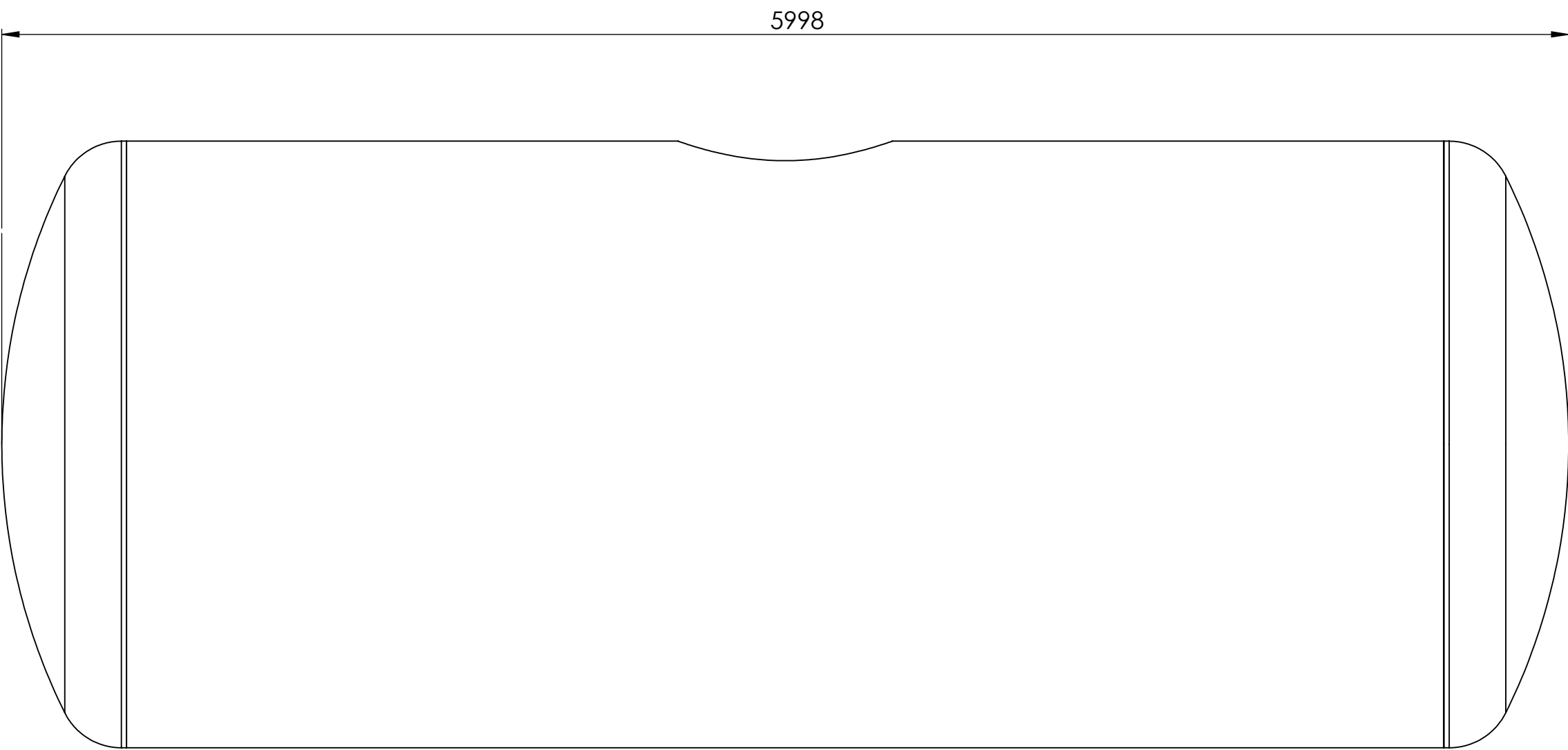
Escala: 1:50



Escala 1:20	Dibujado por: Autor del TFG
Disposición general	Contenedor cisterna ISO



Escala: 1:50



Escala 1:20	Dibujado por: Autor del TFG
Disposición general	Contenedor cisterna ISO

ANEXO II: Aviso responsabilidad UC

AVISO:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”